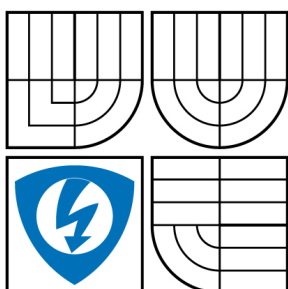


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

ELEKTRICKÉ CHARAKTERISTIKY POVRCHOVÉHO VÝBOJE PRO ROZKLAD ORGANICKÝCH LÁTEK

ELECTRICAL FEATURES OF SURFACE DISCHARGE FOR ORGANIC MATERIAL
DECOMPOSITION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

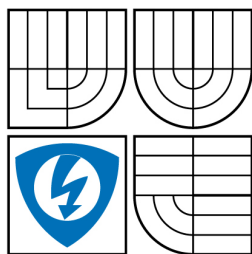
MARTIN BUDÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. MILADA BARTLOVÁ, Ph.D.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student: Martin Budík

ID: 73077

Ročník: 3

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Elektrické charakteristiky povrchového výboje pro rozklad organických látek

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proměřte VA charakteristiky zapálení povrchového výboje.
2. Určete vliv průtoku a typu nosného plynu na VA charakteristiku a moment zapálení povrchového výboje.
3. Proměřte dynamické charakteristiky povrchového výboje v různých nosných plynech o různém průtoku
4. Stanovte energetické poměry ve výboji pomocí dynamických charakteristik.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Krčma, F.: Kinetic Processes in Nitrogen Post-Discharge Plasmas, VUT IUM Brno 2004, pages 1 – 40, Edice Habilitační a inaugurační spisy, svazek 132, ISSN 1213-418X, ISBN 80-214-2572-5.
- [2] Krčma F., Protasevich E. T.: Post-discharges in Pure Nitrogen and in Nitrogen Containing Halogenated Hydrocarbon Traces, Tomsk Polytechnic University Publishing, Tomsk 2003, pages 1 – 132, ISBN 189-8326-444.
- [3] Krčma F.: Spectroscopic Studies of the Methane Traces Influence on the Nitrogen Afterglow, Ph.D. Thesis, Brno 1995, pages 1 – 210.

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 2.6.2009

Vedoucí práce: doc. RNDr. Milada Bartlová, Ph.D.

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

ANOTACE

Cílem této bakalářské práce je popsání elektrického povrchového výboje pro rozklad organických látek, který bude dále sloužit k praktickému proměření VA charakteristiky zapálení povrchového výboje, vlivu průtoku a typu nosného plynu na VA charakteristiku a moment zapálení povrchového výboje, proměření dynamických charakteristik povrchového výboje v různých nosných plynech o různém průtoku a stanovení energetických poměrů ve výboji pomocí dynamických charakteristik.

Klíčová slova: povrchový výboj, VA charakteristika, dynamická charakteristika, zapálení povrchového výboje.

ABSTRACT

The aim of this semestral work is to describe importance of electric surface discharges for decomposition of organic substances. This will serve to practical measurement of VA characteristic of surface discharge ignition, flow effect and type of portative gas for VA characteristic and moment of ignition of surface discharge. Then measurement of dynamic characteristic of surface discharge in assorted portative gases with diverse kind of flowage and setting of energetic ratios in discharge by means of dynamic characteristics.

Keywords: surface discharge, VA characteristic, dynamic characteristic, ignition of surface discharge.

BUDÍK, M. Elektrické charakteristiky povrchového výboje pro rozklad organických látek. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 64 s. Vedoucí bakalářské práce doc. RNDr. Milada Bartlová, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Elektrické charakteristiky povrchového výboje pro rozklad organických látek jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestně právních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. RNDr. Miladě Bartlové, Ph.D za užitečnou pomoc a cenné rady při zpracování práce. Dále bych chtěl poděkovat za pomoc při měření a zpracování výsledku doc. RNDr. Františkovi Krčmovi, Ph.D., Ing. Zdence Kozákové, Ph.D. a Ing. Janě Vyhnalíkové.

V Brně dne

.....
podpis autora

Obsah

Obsah	5
1 Úvod	6
2 Elektrický výboj v plynu	7
2.1 Zapálení výboje	7
2.1.1 Pohyb částic v plynu	7
2.1.2 Pružné srážky	9
2.1.3 Nepružné srážky	9
2.1.4 Voltampérová charakteristika výboje	11
2.2 Rozhraní mezi elektrodou a plazmatem	12
2.2.1 Katodová oblast	13
2.2.2 Anodová oblast	15
2.3 Plazma výbojů	16
2.3.1 Elektrická a tepelná vodivost plazmatu	17
2.3.2 Rozdělení výbojů	18
2.3.2.1 Korónový výboj	19
2.3.2.2 Doutnavý výboj	20
2.3.2.3 Obloukový výboj	20
2.3.2.4 Jiskrový výboj	21
2.3.3 Povrchový výboj	21
3 Experimentální část	23
3.1 Uspořádání aparatury	23
3.2 Reaktor pro povrchový výboj	23
3.3 Způsob měření	25
4 Výsledky a diskuze	26
4.1 Měření na odporu	26
4.2 Měření na kondenzátoru	38
5 Závěr	40
6 Literatura	41
7 Použité symboly	42
8 Přílohy	43

1 Úvod

Povrchový výboj patří mezi nejmladší druhy plazmatu, který se ale rychle rozvíjí, protože jde vytvořit za atmosférického tlaku a stává se finančně dostupným. Tento výboj se dostává do různých průmyslových aplikací, příkladem může být použití v plazmové televizi, které se stává v době digitálního vysílání čím dál populárnější. S dalšími výboji se můžeme setkat v elektronkách, usměrňovačích a střídačích, doutnavkách, zářivkách, výbojkách, obloukové peci a jiných aplikacích, ale asi nejznámějším důkazem výboje je bouřkový blesk.

Cílem semestrálního projektu je zaměření na teoretické vlastnosti výboje obecně a pochopení jejich vlastností, které budou využity v bakalářské práci. V té se budou proměřovat elektrické charakteristiky povrchového výboje, které budou využity pro studium tohoto výboje na rozklad organických látek a jeho chování v různých plynech o různém průtoku. K určení těchto vlastností budou sloužit VA charakteristiky povrchového výboje.

Elektrování těles bylo v historii dokazováno jejich vzájemným přitahováním nebo odpuzováním, to zkoumali vědci Woll, Piccard a Fay. Lomonosov vyslovil v roce 1743 domněnku, že blesk a polární záře jsou elektrické povahy. Jeho domněnky dokázali roku 1752 Franklin a roku 1754 český vědec Diviš, kteří nezávisle na sobě postavili první bleskosvody. Dalším důležitým vědcem byl Coulomb, který objevil temný výboj ve vzduchu při pokusech, které vedly k objevení Coulombova zákona. Dále další vědci objevili elektrický oblouk, výbojové trubice, existence iontů v plynech aj., ale hlavní zájem byl věnován použití výbojů k osvětlování, kde se hlavně používal elektrický oblouk. Velký pokrok v této technice znamenala Křižíkova konstrukce obloukové lampy, která se používá i v současné době. Pro poznání vlastností výbojů a jejich teoretické zpracování bylo důležité zavedení pojmu výbojového plazmatu Langmuirem.

2 Elektrický výboj v plynu

Vzduch se v normálních podmínkách chová jako izolant, ale je možno rozštěpit některé molekuly na elektron a kladný iont = ionizovat. Plamen, rentgenové nebo radioaktivní záření, ohřátý vzduch aj., působí jako ionizátor. Ionizátor slouží k doplnění energie, která je potřebná k rozštěpení molekul.

Vzduch je částečně ionizován účinkem kosmického záření a radioaktivity zemské kůry. Elektron vzniklý ionizací se může spojit s neutrální molekulou a vytvořit záporný iont. Současně probíhá uvnitř plynu i děj opačný – rekombinace.

Formálně se každý výboj skládá z elektrod, prostor mezi nimi je vyplněný plynem. Ve velké většině je prostor výbojů vyplněn plazmatem elektrického výboje.

2.1 Zapálení výboje

Podmínkou vzniku výboje je

- a) existence volných nosičů náboje (elektronů a iontů),
- b) elektrická energie dodávaná do plynu. (Elektrickou energii lze do plynu ve výbojce dodávat různými způsoby. Mohou to být dvě elektrody, na kterých je stejnosměrné napětí. V případě koróny je jednou elektrodou kovový hrot, druhou země.).

2.1.1 Pohyb částic v plynu

Výbojová dráha se skládá z plynu s teplotou, která záleží na druhu výboje. Procesy k vytvoření ionizace zařazujeme mezi elementární procesy. Tyto procesy probíhají ve výbojové dráze mezi neutrálními částicemi a nosiči elektrického náboje, nejčastěji to jsou vzájemné srážky částic, ze kterých je plyn složen. Rychlost, jakou do sebe narážejí, závisí na teplotě plynu. Rychlosti všech částic nejsou stejné. Při pružných srážkách je celková kinetická energie částic plynu uzavřeného v určitém objemu konstantní.

Rozdělení rychlostí je popsáno Maxwellovým zákonem, který určuje pravděpodobnost dP_v , že rychlost částic patří do intervalu $\langle v, v + dv \rangle$.

$$dP_v = \frac{4}{v_p^3 \sqrt{\pi}} e^{-\frac{v^2}{v_p^2}} v^2 dv, \quad (2.1)$$

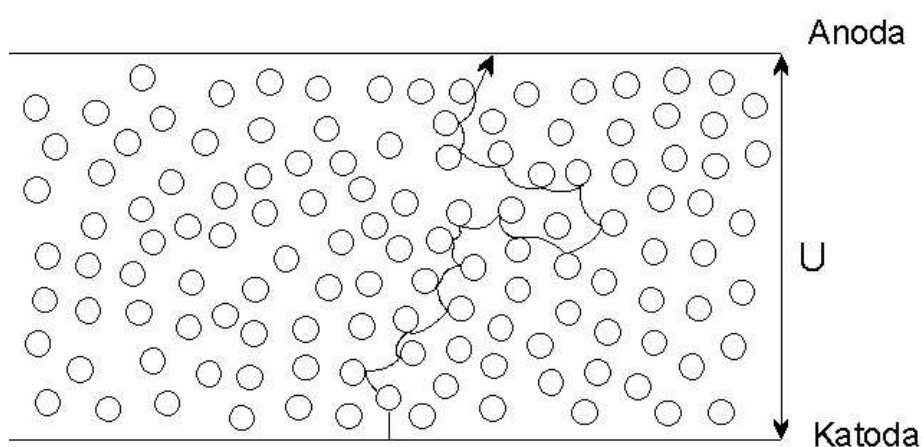
- konstanta v_p = rychlost vyskytující se v plynu nejčastěji – nejpravděpodobnější rychlost,
- počet částic plynu, které se pohybují rychlostí v je dán součinem $n dP_v$ a n je počet částic v objemu plynu.

V plazmatu elektrického výboje hořícího v chemicky čistém plynu najdeme několik druhů částic:

- a) elektrony,
- b) neutrální atomy,
- c) jednoduché nebo vícenásobné ionty,
- d) v některých výbojích molekuly.

Při srážkách částic dochází ke změně energie částic a vytvoří se nové. Nejjednodušším elementárním procesem je urychlování elektronů nebo iontů. Pokud se elektrony a částice pohybují ve směru elektrického pole, pak mluvíme o unášení nebo driftu a působení srážek s ostatními částicemi je pomalý. Obr. 2.1 ukazuje schématicky drift elektronů. Rychlost driftového pohybu je mnohem menší než rychlost elektronů a iontů mezi jednotlivými srážkami. Lze usoudit, že elektrony nebo ionty mají při pohybu všemi směry v plazmatu stejnou rychlost a drift má pro tepelný pohyb druhořadý význam.

Pokud se srazí elektrony s neutrálními částicemi, rychlost se rozdělí podle Maxwellova zákona. Tomuto rozdělení náleží teplota, kterou nazýváme teplotou elektronového plynu nebo teplotou elektronů.



Obr. 2.1 Pohyb elektronu mezi anodou a katadou

Stejným způsobem se rozdělí rychlosti zbývajících částic a příslušné teploty nazýváme teplotou neutrálních částic nebo teplotou plynu a teplotou iontů.

Střední vnitřní energie plynu určuje teplotu jednotlivých druhů částic.

$$W = \frac{1}{2} n_0 m v_{e_f}^2 = \frac{3}{2} n_0 k T, \quad (2.2)$$

Z rovnice vyplývá, že střední energie v jednotkovém objemu plynu závisí pouze na teplotě plynu a hustotě částic, ze kterých je plyn složen [1].

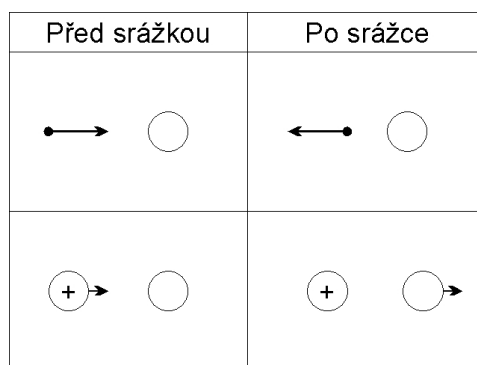
2.1.2 Pružné srážky

Jak už bylo zmíněno v kap. 2.1.1, při těchto srážkách se mění pouze kinetická energie a částice si zachovávají stejnou vnitřní strukturu před i po srážce, změní se pouze směr a velikost rychlostí. Elektron při srážce s atomy mění polohu s nepravidelnou dráhou. Když se srazí s atomem, změní se směr jeho rychlosti a při dvou po sobě jdoucích srážkách je elektron urychlován elektrickým polem směrem k anodě. Schématické znázornění pružných srážek je zakresleno na obr. 2.2.

Elektron při srážkách ztratí malou část své kinetické energie, a pokud zanedbáme ztráty Jouleovým teplem, potom práce vykonaná při přenesení elektronu od katody k anodě ve vakuu se rovná

$$A = eU, \quad (2.3)$$

- U je rozdíl potenciálu mezi anodou a katodou.



Obr. 2.2 Schématické znázornění pružných srážek

2.1.3 Nepružné srážky

Pokud se kinetická energie srážejících se částic zvětší nad určitou hodnotu, dojde ke změně vnitřní struktury částic při srážkách. Jednoduše se dá říct, že při nepružných srážkách dochází ke změně energie srážejících se částic v energii jiného druhu, nejčastěji v potenciální energii vazebních elektronů atomového obalu, změna této energie se projeví nabuzením nebo ionizací atomu.

Elektron obíhající po určité dráze má stále konstantní potenciální energii vzhledem k jádru atomu a nelze ji předat do okolí. Při přechodu z kvantové dráhy s energií W_n do

kvantové dráhy s větší energií W_m spotřebuje elektron práci, která se rovná rozdílu z obou těchto energií a tím pádem je o tuto práci energie atomu větší. Tomu se říká nabuzený stav.

Ve dráze s větší energií setrvá elektron velmi krátce (10^{-8} s) a tento stav není stabilním stavem atomu. Když se atom vrací z nestabilního stavu do stabilního, je rozdíl potenciálních energií elektronu předán do okolí ve formě záření a vzniká foton s energií $h\nu$.

$$W_m - W_n = h\nu, \quad (2.4)$$

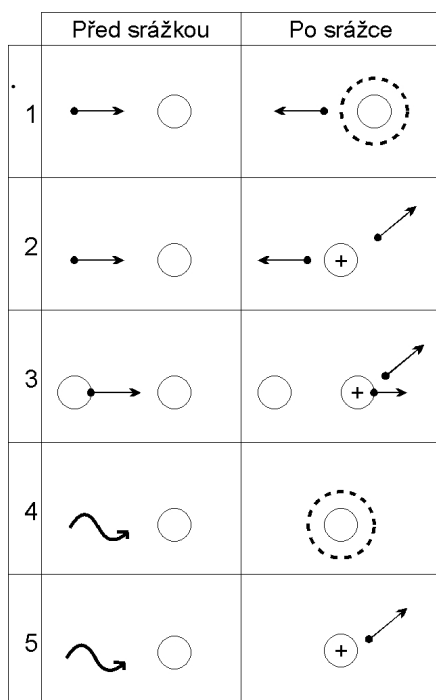
- h je Planckova konstanta,
- ν frekvence záření.

Částice, která má kinetickou energii větší, než má atom v základním stavu, může předat svou kinetickou energii atomu a přivést ho do nabuzeného stavu. Pokud je kinetická energie dostatečně velká, může být elektron oddělen od jádra a nastává ionizace.

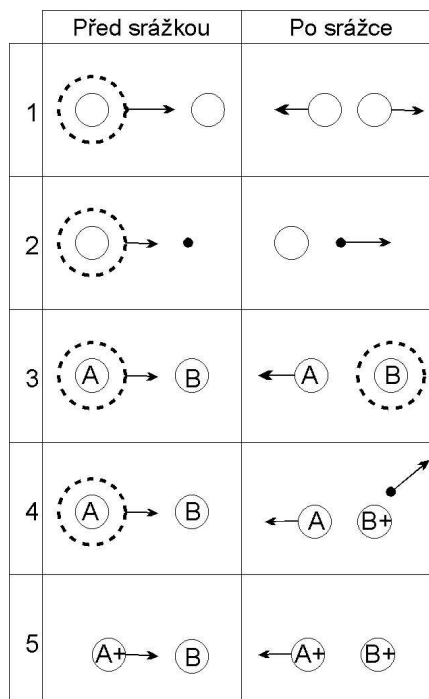
Nepružné srážky dělíme na srážky prvního, druhého řádu a v plazmatu výboje na další druh, kterému říkáme rekombinace, který je vratným pochodem vzhledem k ionizaci.

U srážek prvního řádu se změní část kinetické energie částic před srážkou ve vnitřní energie po srážce. Rychlá částice s velkou kinetickou energií odevzdá při srážce s atomem část své energie, atom je nabuzen nebo ionizován. Srážky jsou uvedeny v obr. 2.3.

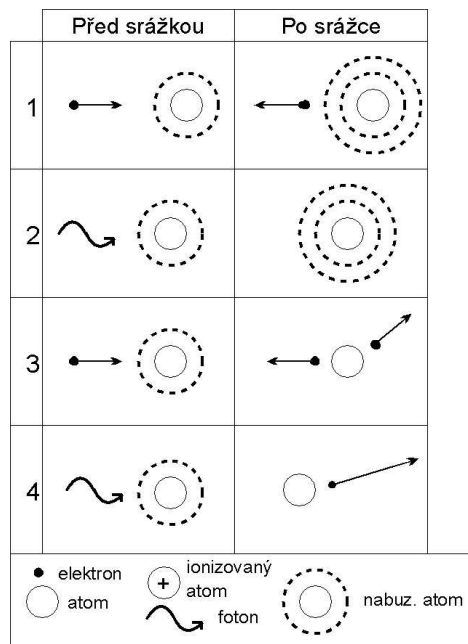
Srážky druhého řádu vzniknou, pokud se srazí částice vzniklé při nepružných srážkách prvního řádu s elektrony, atomy a fotony. Při srážce částice s malou kinetickou energií s nabuzeným atomem se potenciální energie atomu změní v kinetickou energii částice. Srážky jsou uvedeny v obr. 2.4 a obr. 2.5.



Obr. 2.3 Schématické znázornění nepružných srážek prvního řádu



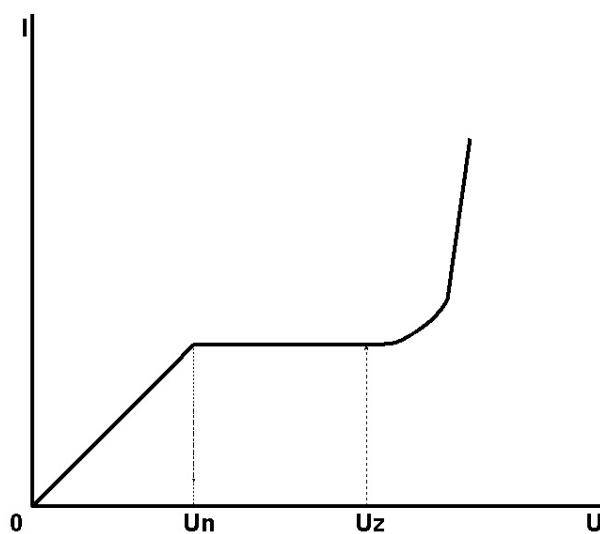
Obr. 2.4 Schématické znázornění nepružných srážek druhého řádu



Obr. 2.5 Schématické znázornění kumulativních efektů

2.1.4 Voltampérová charakteristika výboje

Voltampérová charakteristika je grafické znázornění závislosti proudu na napětí a umožňuje nám určit elektrické vlastnosti výboje.



Obr. 2.6 Voltampérová charakteristika výboje

Pokud je napětí malé, většina iontů zanikne rekombinací dříve, než dorazí na elektrody. Počet elektronů, které předají svůj náboj elektrodám, je přímo úměrný napětí \Rightarrow platí Ohmův zákon.

Od napětí U_n převážná část elektronů nestačí rekombinovat a doletí k elektrodám \Rightarrow prochází nasycený proud (neplatí Ohmův zákon).

Při překročení U_z = zápalné napětí dochází k dalšímu zvyšování proudu. Příčinou je ionizace nárazem - elektrony a ionty, které vzniknou ionizací, narážejí při svém pohybu na neutrální molekuly, kterým předávají kinetickou energii získanou urychlením elektrickým polem. Jsou-li urychleny dostatečně, mají takovou kinetickou energii, že jsou schopny nárazem na neutrální molekulu tuto molekulu ionizovat. Počet iontů tak lavinovitě narůstá a nastává samostatný výboj, který je nezávislý na vnějším ionizátoru. Vysoce ionizovaný plyn v samostatném výboji se nazývá plazma [2].

2.2 Rozhraní mezi elektrodou a plazmatem

V plazmatu výboje se uskutečňuje většina výbojových procesů. Elektrody mají za funkci zprostředkovat elektricky vodivé spojení plazmatu s vnějším okruhem a přechod mezi tuhým a plazmatickým skupenstvím, protože je z velké části případy provázen velkým rozdílem teplot.

Elektronový proud přijde z vnějšího okruhu do elektrody a proud elektronů je na katodě spotřebován na neutralizaci kladných iontů přicházejících z plazmatu a částečně přejde do plazmatu a přes anodu je odváděn do vnějšího okruhu. V okolí elektrod u samostatných výbojů vzniknou pásma se silně klesající teplotou plazmatu a tím i silně klesající elektrickou vodivostí.

Nejjednodušším způsobem, jak uvolnit elektrony z pevné látky je termická emise. Pro přechod elektronů z elektrody (pro názornost uvažujeme výstup elektronu z kovové katody) do vakua je zapotřebí, aby elektron měl kinetickou energii dostačující k překonání potenciálního rozdílu mezi kovem a vakuem. Velikost této energie je určena výstupní prací, kterou vyjadřujeme v eV a nazýváme Richardsonovým potenciálem. Takle metoda uvolňování elektronů z katody se využívá např. v elektrickém oblouku, kde je katoda vyhřívaná plazmatem.

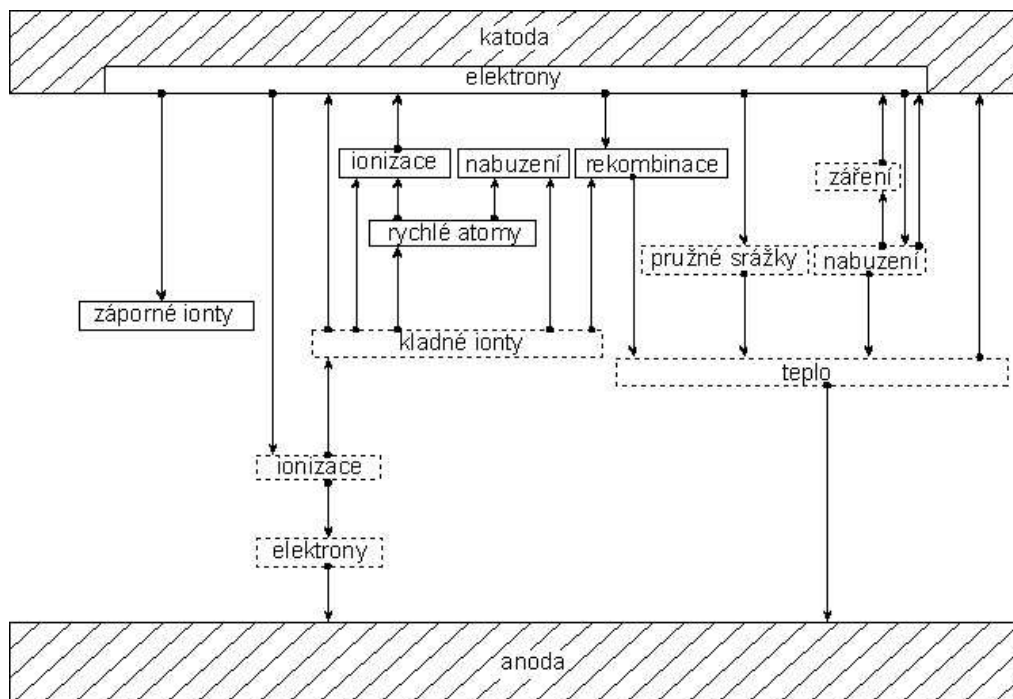
Fotoemise je další způsob uvolňování elektronů z tuhé látky, tj. uvolňování elektronů zářením. Kvantová teorie říká, že zářivá energie může být dodávána pouze v kvantech nebo v množství, které je celistvým násobkem kvant energie. Velikost kvanta určí součin $h\nu$, kde h je Planckova konstanta a ν frekvence příslušného záření. Označíme-li W energii kvantu v eV, dostaneme pro ni po nahrazení frekvence vlnovou délku.

$$W = \frac{3 \times 10^{18} h}{\lambda} = \frac{12398}{\lambda}, \quad (2.4)$$

- vlnovou délku λ dosazujeme v Å.

Aby se elektron uvolnil z kovu, musí být energie kvanta záření větší než výstupní práce pro uvolnění elektronu.

Obr. 2.7 znázorňuje schématicky vzájemné působení plazmatu a elektrod, ve kterém jsou pro úplnost uvedeny všechny elementární procesy probíhající v plazmatu [1].



Obr. 2.7 Vzájemné působení plazmatu a elektrod

2.2.1 Katodová oblast

Plazma samostatných výbojů přechází do katody tzv. patou výboje, která je u většiny vysokotlakých výbojů tvořena katodovou skvrnou. Ve skvrně dosahuje proudová hustota velkých hodnot, přestože bezprostředně před katodou je oblast plazmatu se silně klesající vodivostí.

Existují tři způsoby, jak elektrony mohou být uvolněny z katody

1. Katodu vyhříváme cizím zdrojem nebo elektronovým proudem na teplotu dostačující k tepelné emisi elektronů.
2. Před katodou vznikne působením iontů elektrické pole dostačující k emisi elektronů elektrickým polem.
3. Na základě kruhového oběhu iontů, kdy celkový proud v oblasti katodového úbytku je přenášen pouze ionty, výstup elektronů můžeme podle Maeckera vysvětlit na tomto případě.

Pro intenzitu elektrického pole ve směru osy plazmatu platí Poissonova rovnice

$$\frac{dE}{dx} = \frac{n_j e}{\epsilon}, \quad (2.5)$$

- E je intenzita elektrického pole a směr osy x je totožný se směrem osy oblouku,
- n_j určuje hustotu iontů a e náboj elektronu a ϵ je náboj elektronu.

dále platí

$$E = -\frac{dU}{dx}, \quad (2.6)$$

- U nám udává napětí na elektrodách.

Proudová hustota je dána vztahem

$$j = eb_j n_j E, \quad (2.7)$$

- b_j je pohyblivost iontů.

Po dosazení z rovnice (2.5) do poslední rovnice dostaneme

$$j = \frac{b_j}{2\varepsilon} \frac{dE^2}{dx}, \quad (2.8)$$

Po integraci a řešení podle E dostaneme

$$E = \sqrt{\frac{2\varepsilon j}{b_f} \Delta x^{\frac{3}{2}}}, \quad (2.9)$$

Za E dosadíme z rovnice (2.6) a po druhé integraci dostaneme

$$\Delta U = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{2\varepsilon j}{b_j}} x, \quad (2.10)$$

Obě integrace byly provedeny přes prostor katodového úbytku. ΔU je tedy katodový úbytek a Δx tloušťka katodové vrstvy.

Množství tepla převzaté katodou z prostoru katodového úbytku je definován podle Riedera

$$Q = I(U_k - U_v), \quad (2.11)$$

- I je proud tekoucí výbojem,
- U_k je katodový úbytek a U_v výstupní práce.

Ionty rekombinované s elektrony se vracejí jako neutrální atomy s poměrně velkou energií zpět do katodového prostoru a ke zvýšení teplené energie plynu před katodou slouží

jejich kinetická energie. Následná teplota plynu se stává tak velkou, že stačí k dodávání iontů a k uzavření kruhového oběhu iontů.

Okolní vzduch chladí plazma, proto se musí jeho průřez stáhnout, aby nastalo požadované zvýšení teploty. Zúžení průřezu oblouku a malá velikost katodové skvrny potřebují jako podmínku nízkou teplotu katody. Při zvýšení teploty katody vyhřáté cizím zdrojem se zvětší velikost katodové skvrny. Teplota anodové oblasti oblouku je nižší než teplota katodové oblasti.

V obloucích s velkými výkony a vysokými teplotami katody se obvykle katodová skvrna nevytvorí.

U nesamostatných výbojů se žhavenou katodou se určuje proudová hustota elektronového proudu vystupujícího z katody podle Richardsonového vztahu

$$J = AT^2 e^{\frac{-eU_v}{kT}}, \quad (2.12)$$

- J je proudová hustota a A materiálová konstanta.

Aby proudová hustota byla co největší, musí se kov ohřát na velkou teplotu. Maximální teplota, na kterou může být kov ohřán, určuje bod tání. Druhou možností jak hustotu zvýšit, je použití látky s velkou konstantou A a malým výstupním potenciálem U_v .

2.2.2 Anodová oblast

U anody je přechod z elektronového vedení elektřiny ve vnějším okruhu na elektronové a iontové vedení v plazmatu mnohem více patrný než u katody. I když se v anodovém úbytku mění gradient, proud elektronů v elektrickém poli výboje zůstává stejný jako ve vnějším okruhu a stejně se chová i proud pomalých záporných iontů tekoucí z katodového úbytku. Následkem putování iontů ke katodě je prostor u anody o ně ochuzen a vzniká anodový úbytek, tvořící přechod z plazmatu na anodu a velikost bude závislá na vlastnostech plazmatu a anody.

Hlavním úkolem anodového úbytku je přeměňovat neutrální částice na ionty, které poté putují plazmatem oblouku ke katodě. Tyto ionty musí být do plazmatu přivedeny s určitým rozdělením rychlostí - takovým, že odpovídající teplota iontů se rovná teplotě plazmatu.

Pro vytvoření iontů je zapotřebí, aby nárazová ionizace v prostoru anodového úbytku byla bohatší než v plazmatu, z tohoto důvodu je zapotřebí větší energie elektronů, získávané na úkor elektrického pole. Tato energie může být předána dvěma způsoby.

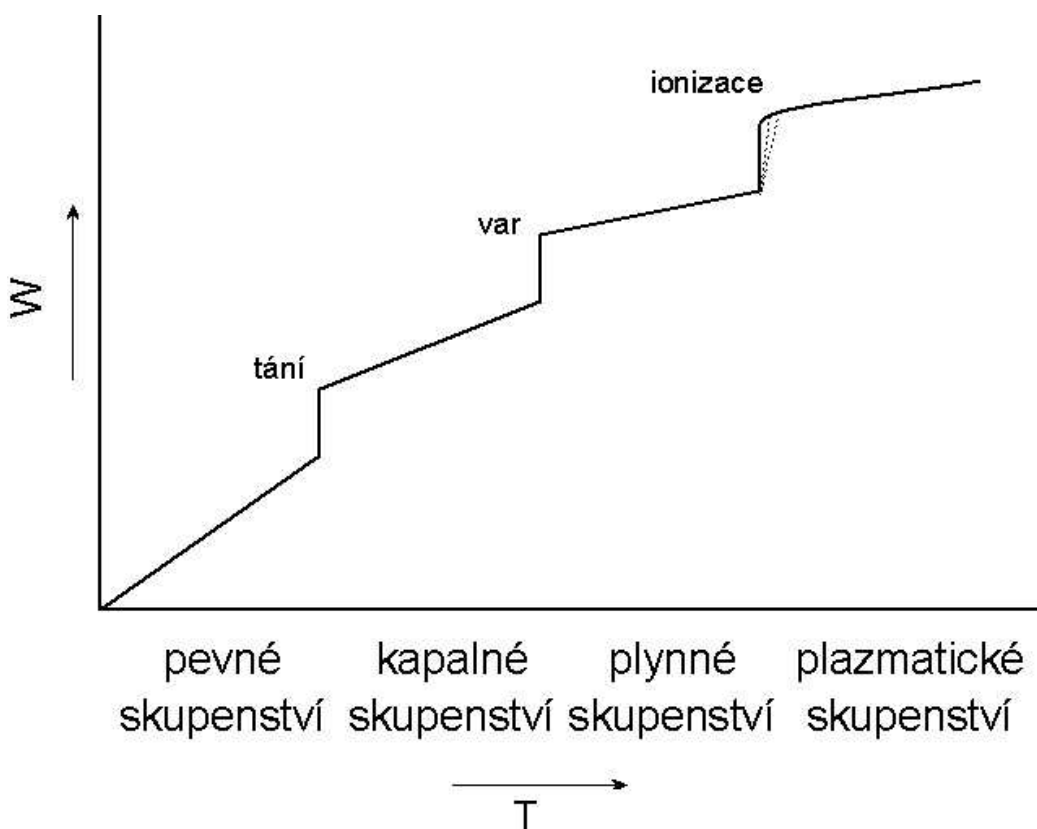
1. Ionizací elektrickým polem – anodový úbytek musí být větší než ionizační napětí,
2. Tepelnou ionizací – průměrná tepelná energie elektronů zůstává menší než ionizační energie.

2.3 Plazma výbojů

Hmotu dělíme podle obsahu tepelné energie do čtyř skupenství:

- a) pevné,
- b) kapalné,
- c) plynné,
- d) plazmatické.

Obr. 2.8 znázorňuje obsah tepelné energie ve hmotě v jednotlivých skupenství.



Obr. 2.8 Závislost tepelné energie hmoty na teplotě

Lze říci, že hmota s velkým obsahem tepelné energie je plazma. V tuhém skupenství mají látky atomy uspořádané v pravidelné mřížce ve vzdálenostech řádově 10^{-8} cm. Atomy na sebe vzájemně intenzivně působí a to se omezuje pouze na nejbližší atomy. Kinetická energie kmitavého pohybu atomů je měřítkem teploty látky. Při zahřívání pevné látky se urychluje kmitavý pohyb atomů a zvětšuje se jejich vzdálenost, tím se zvětší objem a teplota látky. Pokud se látka zahřeje na teplotu tání, poruší se struktura a látka přejde v kapalinu. Kapalná látka má mnoho vlastností společné s látkou tuhou a obě skupenství se nazývají kondenzát.

Pokud kapalná látka přejde v plynou, tak nastávají větší změny např.: vzdálenost atomů je 10^{-6} , chaotický pohyb, doba vzájemného působení při srážce řádově 10^{-3} .

Zahříváním látky v plynném skupenství dochází k disociacím molekul, kinetická energie molekul při určité teplotě je tak velká, že při srážkách se molekuly rozdělí na jednodušší částice. Některé atomy mají tak velkou kinetickou energii, při které dojde k vytržení elektronu z obalu, tj. k ionizaci. V Tab. 2.1 jsou uvedeny vlastnosti hmoty v jednotlivých skupenstvích.

Tab. 2.1 Fyzikální vlastnosti hmoty v jednotlivých skupenstvích

Skupenství	tuhé	kapalné	plynné	plazmatické
Teplota	nízká	vyšší	vysoká	velmi vysoká
Uspořádání	v pravidelné mřížce	v podstatě neuspořádané	chaotický pohyb	chaotický pohyb
Vzdálenost atomů	malá 10^{-8}	malá	velká	velká
Střední rychlost atomů	10^2 m/s	10^3 m/s	10^3 m/s	10^4 m/s
Vzájemné působení	trvalé a silné pouze mezi sousedními atomy	trvalé a silné pouze mezi sousedními atomy	jen po velmi krátkou dobu	trvalé a silné na velkou vzdálenost
Vyzařování	velmi nepatrné	velmi nepatrné	velmi nepatrné	intenzivní
Elektrická vodivost	různá	malá, popř. nulová	téměř nulová	velká

K hlavním znakům plazmatu patří intenzivní vyzařování a dobrá elektrická vodivost, protože obsahuje nosiče elektriny. Plazma je v podstatě plyn se složkami tvořenými elektricky nabitými částicemi a zahřátý na vysokou teplotu.

Aby byl plyn v plazmatickém stavu, stačí, když teplota aspoň jedné složky (nejčastěji teplota elektronů), je tak velká, že kinetická energie částic této složky dostahuje k ionizaci ostatních složek plazmatu při vzájemných srážkách. Izotermické plazma má stejnou teplotu složek, naopak pokud jsou teploty složek různé, nazýváme plazma neizotermickým.

2.3.1 Elektrická a tepelná vodivost plazmatu

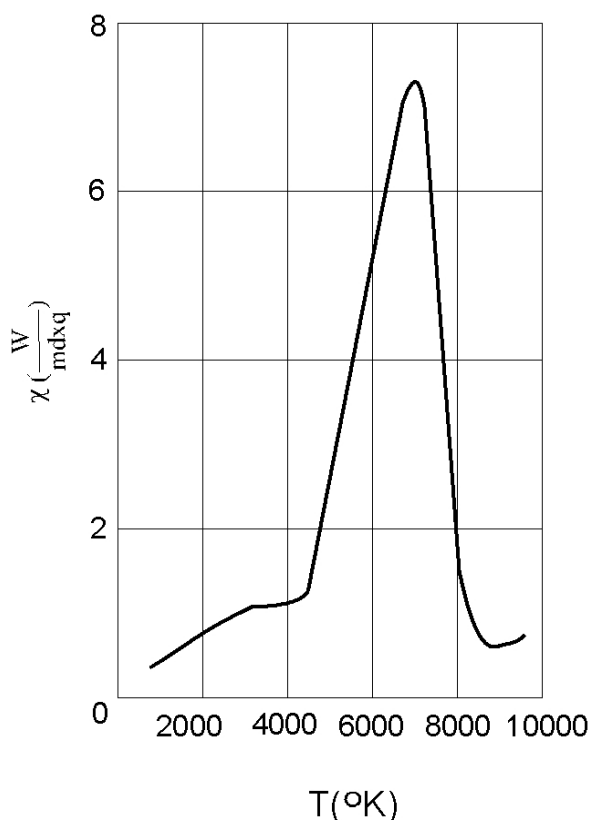
Vysoké teploty plazmatu a jimi podmíněné velké stupně ionizace, popř. disociace mají za následek, že v plazmatu probíhají chemické procesy ve formě disociačních, ionizačních a rekombinačních procesů.

Velký stupeň ionizace má za příčinu velkou koncentraci elektricky nabitých částic obou znamének a s ní související velkou elektrickou vodivost. Velkou vodivostí se v plazmatu vyrovnávají všechny potenciální rozdíly, které nejsou udržovány z vnějšího zdroje.

Vodivost se vypočítá podle následujícího vzorce [1]:

$$\sigma = \frac{e^2}{3mkT} \frac{n_e}{nQ + n_+ A_+ + n_{++} Q_{++}}, \quad (2.13)$$

Výpočet tepelné vodivosti plazmatu je poměrně složitý, a proto na obr. 2.9 je uveden pouze výsledek výpočtu tepelné vodivosti plazmatu oblouku hořícího ve vzduchu [1].



Obr. 2.9 Tepelná vodivost plazmatu oblouku hořícího ve vzduchu

2.3.2 Rozdělení výbojů

Podle doby trvání:

- a) Ustálené,
- b) Přechodné.

Ustálené výboje dělíme na:

- a) Samostatné – nepotřebují zdroj nosičů náboje, jsou schopny samostatně existovat.
- b) Nesamostatné – potřebují buď zdroj nosičů elektriny, anebo zdroj energie schopný ionizovat atomy.

Druhy samostatných výbojů

- a) temný výboj,
- b) korónový výboj,
- c) doutnavý výboj,
- d) obloukový výboj,
- e) jiskrový výboj.

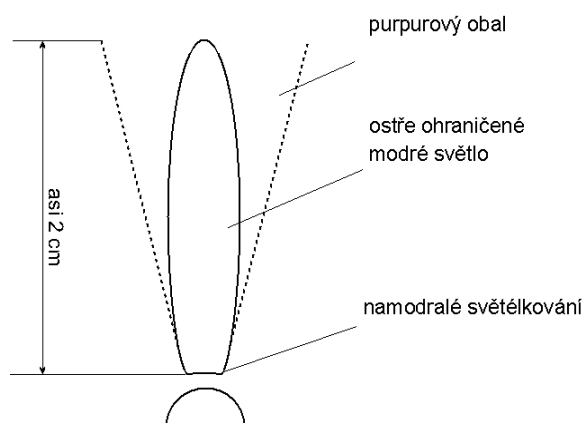
2.3.2.1 Korónový výboj

Tento výboj vzniká při atmosférickém tlaku. Hlavní podmínkou vzniku kórony je nehomogenní elektrické pole ve výbojové dráze, která vzniká v okolí elektrod s malým poloměrem křivosti povrchu. Plazma korónového výboje tvoří většinou velmi tenkou vrstvu kolem elektrody. Na svítící část korónového výboje navazuje vnější obor koróny, ve kterém neprobíhají elementární procesy prvního řádu a v němž se nenachází elektrony. Vedení elektrického proudu vnějším oborem způsobuje pouze pohyb kladných a záporných iontů.

Pokud se koróna vyskytuje pouze na jedné elektrodě, jsou ve vnějším oboru k dispozici pouze ionty s polaritou odpovídající polaritě elektrody, na které se koróna vyskytuje. Tomuto typu koróny říkáme unipolární, její schéma je nakresleno na obr. 2.10.

Koróna patří mezi samostatné výboje, rozdíl oproti ostatním samostatným výbojům spočívá v tom, že nepotřebuje stabilizační odpor. Vzniká při určitém počátečním napětí, je-li napětí na elektrodách nižší než počáteční napětí koróny, vznikne tichý výboj.

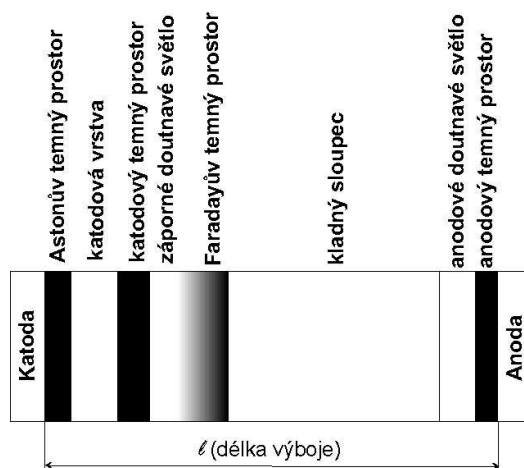
Způsobuje negativní jevy jako ztráty na vedení vysokého napětí, ruší rozhlas a televizi.



Obr. 2.10 Schématické znázornění koróny

2.3.2.2 Doutnavý výboj

Tento výboj patří mezi samostatné výboje se studenou katodou, ve kterém mají význačný význam prostorové výboje. Vzniká ve výbojové trubici, jejíž náplň má nižší tlak, než je tlak atmosférický, a to při dostatečně vysokém napětí na elektrodách. Při překročení zápalného napětí začne výbojovou trubicí téct proud řádově rovný 10^{-3} A [1]. Doutnavý výboj se používá jako úsporný zdroj světla (v xenonových, sodíkových, rtuťových výbojkách a v zářivkách). Světlo výbojek se stává při určitém příkonu asi 5krát intenzivnější než světlo klasických žárovek. Ve rtuťových parách v křemenných trubicích je doutnavý výboj zdrojem UV záření [3]. Na obr. 2.11 je schématické znázornění výboje.

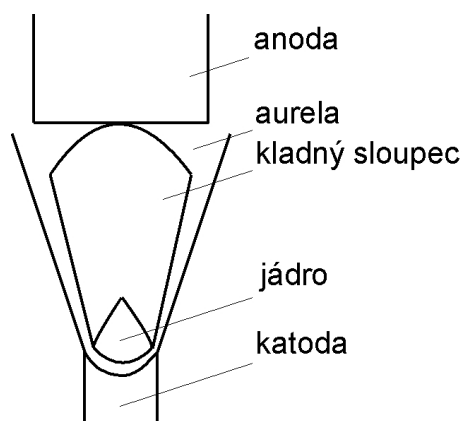


Obr. 2.11 Schématické znázornění vzhledu doutnavého výboje

2.3.2.3 Obloukový výboj

Obloukový výboj se řadí mezi samostatné výboje, který vzniká za atmosférického nebo zvýšeného tlaku. Hlavním znakem výboje je velký proud protékající výbojovou dráhou. S tímto hlavním znakem souvisí vysoká teplota obloukového plazmatu a intenzivní vyzařování z oblouku. Obloukový výboj se vyznačuje dalšími znaky: malý rozdíl potenciálů na elektrodách, řádově rovným desítkám voltů, malý katodový úbytek a katodová skvrna s vysokou teplotou. U některých druhů oblouků se stává, že katodová skvrna pokrývá celý povrch katody.

Podle druhu napájecího proudu rozdělujeme oblouky na napájené stejnosměrným proudem (obr. 2.12) a střídavým proudem [1].



Obr. 2.12 Schématické znázornění vzhledu stejnosměrného oblouku

2.3.2.4 Jiskrový výboj

Jiskra v atmosférickém vzduchu je nejstarší známý příklad uměle vyvolaných elektrických výbojů, který vznikne z korónového výboje, když napětí na elektrodách překročí určitou hodnotu nazývanou průrazné napětí.

Krátkou dobu se jiskra podobá elektrickému oblouku. Tvoří ji několik výbojových kanálů, které mají poměrně malý průřez a vyzařují velmi intenzivní světlo. Poměrně velký zvuk provází přeskok jiskry, to je způsobeno vytvořením rázové vlny ve vzduchu při vzniku výbojové dráhy jiskry.

I když časové trvání jiskrového výboje je velmi krátké, zařazujeme ho do samostatných výbojů. Ve velkém množství nepotřebuje jiskra vnější zdroj, který by ionizačními pochody vytvářel elektrické náboje ve výbojové dráze [1]. Nejznámějším jiskrovým výbojem je blesk, kterým se vyrovnává napětí (miliony voltů) mezi dvěma mraky nebo mezi mrakem a zemí [3].

2.3.3 Povrchový výboj

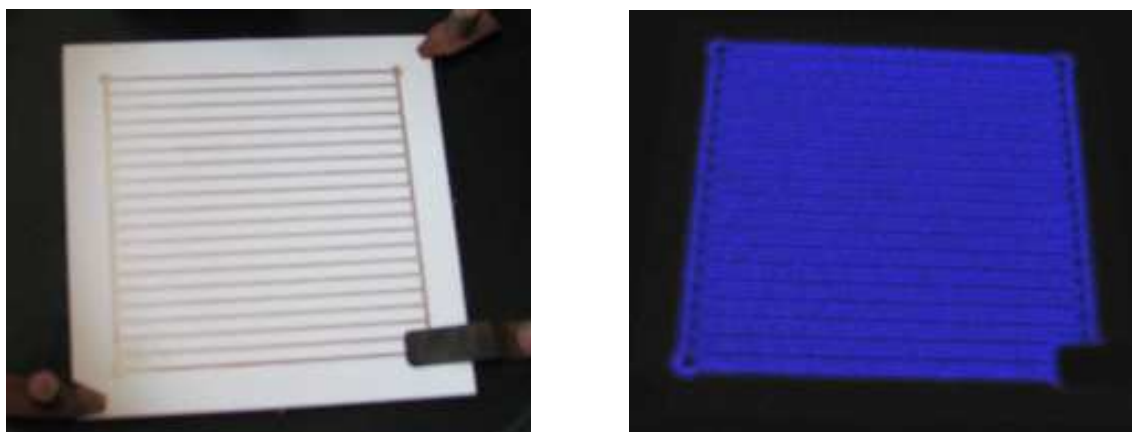
Tento výboj patří do skupiny dielektrických bariérových výbojů, které se generují pomocí různých konfigurací elektrod, kde se v prostoru mezi elektrodami nachází aspoň jedna dielektrická vrstva [4].

Povrchový výboj probíhá za atmosférického tlaku, který je snadno dosažitelný, na rozdíl od jiných výbojů, které probíhají za nízkého tlaku, kde je potřeba vakuová aparatura.

Výboj je distribuován a regulován na povrchu elektrody, která je tvořena řadou kovových pásek vzájemně oddělených dielektrickou vrstvou. Výboj je zapotřebí vybudit střídavým napětím na elektrodách, protože dielektrická bariéra znemožňuje tečení stejnosměrného proudu. Schéma vlastní elektrody, kterou sestavil doc.Krčma, je vyfocena na obr. 2.13 , kde v levé části je znázorněna elektroda samotná a vpravo je zobrazena elektroda při výboji.

Výboj obsahuje velkou část vlastních mikrovýbojů, které mají průměr kolem 0,1mm. Na povrchu dielektrika se pomalu zvětšují a pokrývají oblast podstatně větší než vlastní mikrovýboj. Vlastní mikrovýboj lze charakterizovat jako slabý plazmový kanál, který vzniká

v okamžiku, kdy intenzita elektrického pole dosáhne průrazné hodnoty plynu. Probíhající mikrovýbojem dojde k nabití dielektrika v oblasti mikrovýboje. Z tohoto důvodu dojde k lokálnímu poklesu intenzity elektrického pole a zhasnutí mikrovýboje. Dokud stoupá intenzita elektrického pole, objevují se další a další mikrovýboje. Pokaždé se objevují na nových pozicích, protože v místech proběhlých výbojů je intenzita elektrického pole redukována. Po obrácení intenzity se mikrovýboje objevují také v původních místech, většinou to je způsobeno nejvíce posílením intenzity nabitím dielektrika z předchozího mikrovýboje. Teplota částic se pohybuje řádově 500 K, proto výboj považujeme za nízkoteplotní plazma a nazývá se také studené plazma [5].

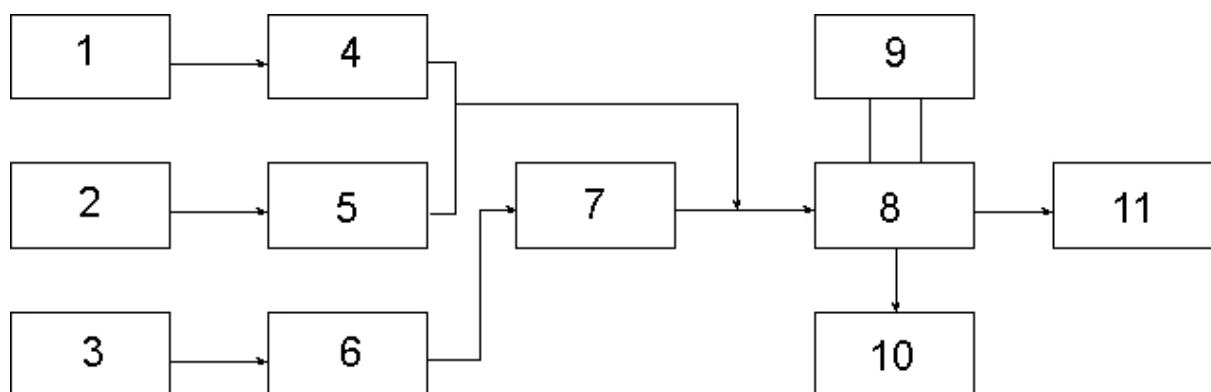


Obr. 2.13 Schéma použité elektrody (vlevo bez výboje, vpravo při výboji) [5]

3 Experimentální část

3.1 Uspořádání aparatury

Uspořádání aparatury je zobrazeno na obr. 3.1. Jednotlivé plyny se přivádí přes regulátory hmotnostního průtoku, které slouží k regulování jejich průtoků. Část přiváděného průtoku dusíku prochází přímo přes láhev s těkavou organickou látkou a unáší tak páry této látky směrem k reaktoru. Připravený vzduch se přivádí až k výstupu láhve VOC a výsledný proud plynů s parami VOC vstupuje do reaktoru, kde následně dochází k rozkladné reakci pomocí povrchového výboje. Napětí potřebné k vzniku výboje je do reaktoru přiváděno pomocí univerzálního plazmového reaktoru o výkonu 100 W. Reaktor se skládá ze dvou výstupů, první slouží k odběru vzorku a druhý je napojen pomocí hadice na opad, přes který se odvádějí další produkty. Všechny použité hadice jsou vyrobeny z polyethylenu.



Obr. 3.1 Schéma uspořádání aparatury

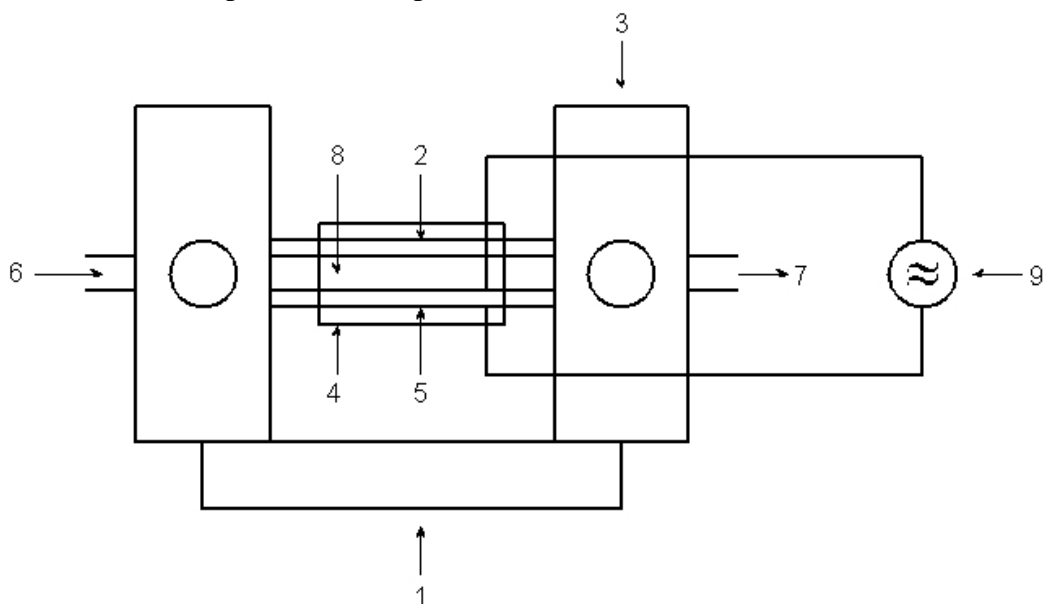
Popis aparatury

- 1, 2, 3 – tlakové láhve (1 – kyslík, 2, 3, dusík),
- 4, 5, 6 – soustava regulátorů konstantního průtoku,
- 7 – nádoba na VOC,
- 8 – vlastní reaktor,
- 9 – zdroj napětí,
- 10 – odběr vzorků pro chemickou analýzu,
- 11 – odtah.

3.2 Reaktor pro povrchový výboj

Schématické znázornění plazmového reaktoru je na obr. 3.2, což je boční pohled na reaktor a skutečná podoba reaktoru je vidět na obr. 3.3. Reaktor pracuje na principu dielektrického bariérového výboje. Elektroda s rozměry 10 x 10 cm je tvořena řadou kovových pásků vzájemně oddělených dielektrickou vrstvou. Na elektrodě je distribuován a

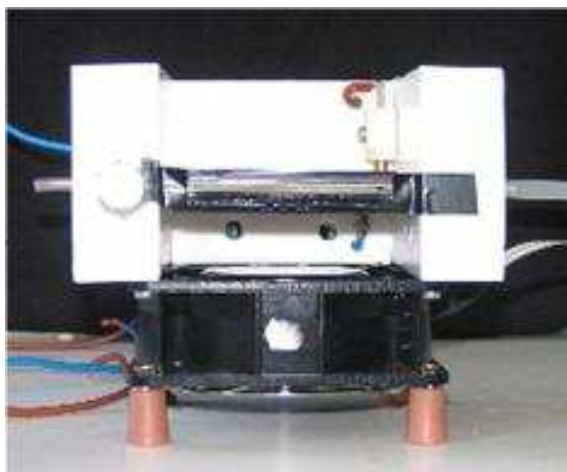
regulován vlastní výboj. Proměnnými parametry reaktoru je výkon a frekvence. Převážná část zařízení se skládá z teflonu, a protože se reaktor velmi rychle zahřívá, není možná dlouhodobá práce. Čas výboje pro práci trvá po dobu 1 minuty. Chlazení výboje se uskutečňuje pomocí větráku umístěného na spodní straně a proudu okolního vzduchu.



Obr. 3.2 Schéma bočního pohledu na reaktor

Popis reaktoru:

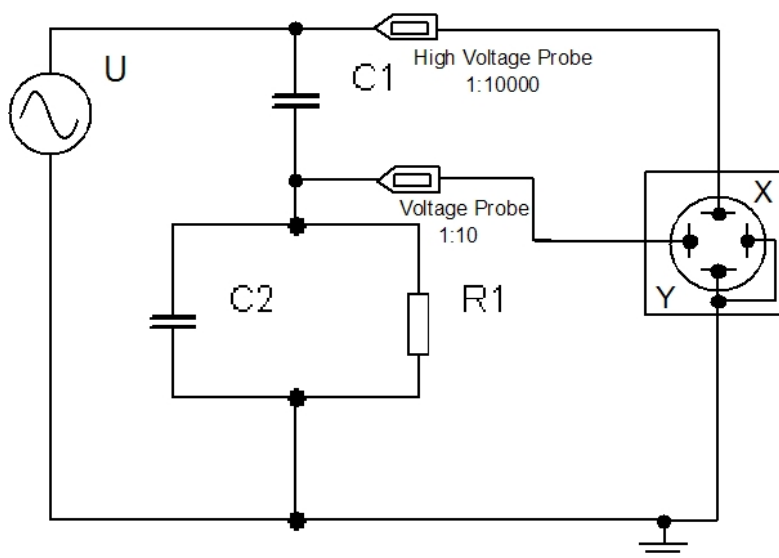
- 1 – větrák,
- 2 – elektrody (Ag, Ni),
- 3 – teflon,
- 4 – křemenné okénko tloušťka 0,5 mm,
- 5 – krycí destička z koraudu (Al_2O_3),
- 6 – přívod plynů,
- 7 – odvod plynů,
- 8 – výbojový prostor,
- 9 – napájení elektrod.



Obr. 3.3 Skutečný pohled na přístroj

3.3 Způsob měření

Měření se skládá ze dvou částí. V první části jsou zjišťovány změny proudu protékajícího obvodem při změně složení plyné směsi. Nosným plynem je vzduch v různých poměrech, který se mísí s toluenem. Toluén má průtok 0,5 l/min a vzduch průtok 3,5 l/min. Měření probíhá s digitálním osciloskopem, pomocí kterého se měří napětí mezi dielektrikem a napětí na odporu. Odpor má velikost $26,6 \Omega$ a bude sloužit pro výpočet proudu. Schéma zapojení je znázorněno na obr. 3.4. V druhé části se měří napětí na kondenzátoru o velikosti 46 pF a napětí mezi dielektrikem.

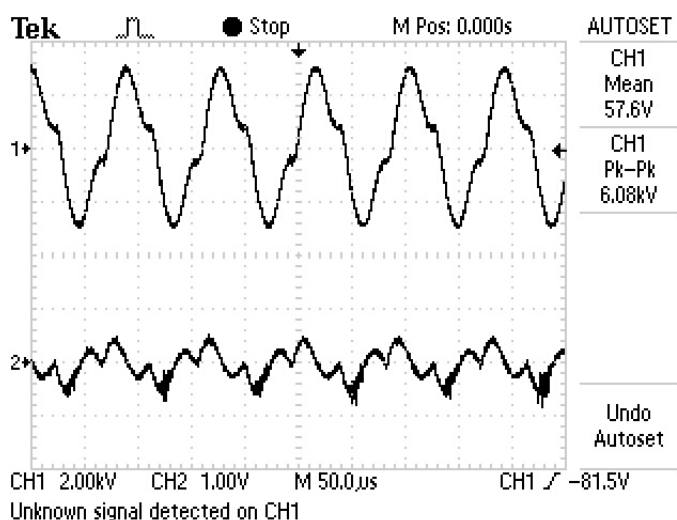


Obr. 3.4 Schéma zapojení

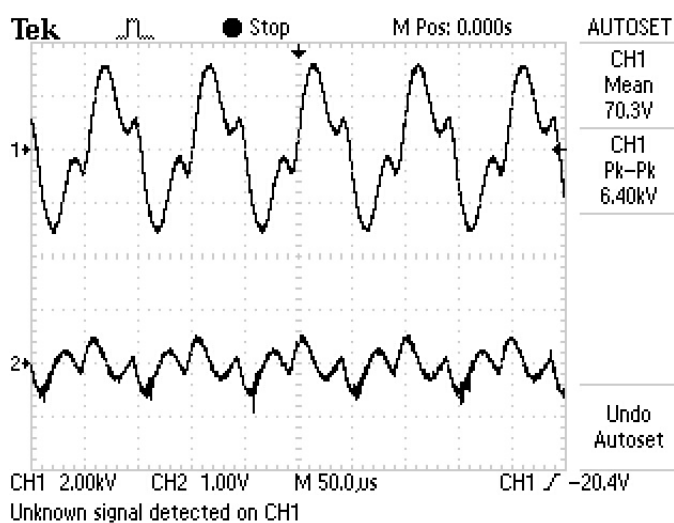
4 Výsledky a diskuze

4.1 Měření na odporu

V první fázi bylo změřeno napětí mezi dielektrikem a napětí na odporu $26,6 \Omega$, nosný plyn vzduch měl průtok 3,5 l/min v poměrech 0,5 l/min O_2 a 3 l/min N_2 ; 0,7 l/min O_2 a 2,8 l/min N_2 ; 1 l/min O_2 a 2,5 l/min N_2 ; 1,5 l/min O_2 a 2 l/min N_2 ; 2 l/min O_2 a 1,5 l/min N_2 ; 2,5 l/min O_2 a 1 l/min N_2 ; 3 l/min O_2 a 0,5 l/min N_2 ; byl mísen s toluenem o konstantním průtoku 0,5 l/min. Měření bylo provedeno vždy pro určitý průtok pro 5 frekvencí, ty byly stanoveny na hodnoty 11,111 kHz; 10,526 kHz; 10 kHz; 9,090 kHz; 8,333 kHz. Příklady grafů z osciloskopu jsou na obr. 4.1 až obr. 4.2, ostatní jsou přiloženy v Příloze A. Kanál jedna zobrazuje průběh napětí mezi dielektrikem a kanál dva průběh napětí na odporu.



Obr. 4.1 Nosný plyn vzduch 0,5 l/min O_2 a 3 l/min N_2 – mísí se s toluenem při frekvenci 11,111 kHz



Obr. 4.2 Nosný plyn vzduch 0,5 l/min O_2 a 3 l/min N_2 - mísí se s toluenem při frekvenci 10,526 kHz

Na grafech z osciloskopů je vidět celkem stabilní oscilace napětí a objevující se proudové impulzy odpovídající generaci jiskrových mikrovýbojů (streamerů) na povrchu elektrody.

Pomocí Ohmova zákona byl vypočítán protékající proud:

$$R = \frac{U}{I} \Rightarrow I = \frac{U}{R}, \quad (4.1)$$

V tab. 4.1 jsou zapsány naměřené a vypočítané hodnoty.

Tab. 4.1 Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot

	Amplituda VN	Napětí na odporu	Efektivní napětí na odporu	Proud protékající odporem	Efektivní proud protékající odporem
Vzduch ve složení 0,5 l/min kyslíku a 3 l/min dusíku	U	U_{odp}	U_{ef}	I_{odp}	I_{ef}
Frekvence (kHz)	kV	V	V	A	A
11,111	3,12	0,42	0,297	0,016	0,011
10,526	3,2	0,51	0,361	0,019	0,014
10,000	3,36	0,62	0,438	0,023	0,016
9,090	3,56	0,65	0,460	0,024	0,017
8,333	3,8	0,81	0,573	0,030	0,022
Vzduch ve složení 0,7 l/min kyslíku a 2,8 l/min dusíku	U	U_{odp}	U_{ef}	I_{odp}	I_{ef}
Frekvence (kHz)	kV	V	V	A	A
11,111	3,04	0,42	0,297	0,016	0,011
10,526	3,02	0,43	0,304	0,016	0,011
10,000	3,24	0,62	0,438	0,023	0,016
9,090	3,4	0,61	0,431	0,023	0,016
8,333	3,8	0,79	0,559	0,030	0,021
Vzduch ve složení 1 l/min kyslíku a 2,5 l/min dusíku	U	U_{odp}	U_{ef}	I_{odp}	I_{ef}
Frekvence (kHz)	kV	V	V	A	A
11,111	3	0,43	0,304	0,016	0,011
10,526	3	0,41	0,290	0,015	0,011
10,000	3,32	0,62	0,438	0,023	0,016
9,090	3,4	0,61	0,431	0,023	0,016
8,333	3,64	0,8	0,566	0,030	0,021
Vzduch ve složení 1,5 l/min kyslíku a 2 l/min dusíku	U	U_{odp}	U_{ef}	I_{odp}	I_{ef}
Frekvence (kHz)	kV	V	V	A	A
11,111	3,04	0,41	0,290	0,015	0,011
10,526	3,28	0,49	0,346	0,018	0,013
10,000	3,4	0,61	0,431	0,023	0,016
9,090	3,6	0,79	0,559	0,030	0,021

8,333	3,8	0,81	0,573	0,030	0,022
Vzduch ve složení 2 l/min kyslíku a 1,5 l/min dusíku	U	U_{odp}	U_{ef}	I_{odp}	I_{ef}
Frekvence (kHz)	kV	V	V	A	A
11,111	3,08	0,39	0,276	0,015	0,010
10,526	3,24	0,51	0,361	0,019	0,014
10,000	3,44	0,59	0,417	0,022	0,016
9,090	3,68	0,78	0,552	0,029	0,021
8,333	3,9	0,82	0,580	0,031	0,022
Vzduch ve složení 2,5 l/min kyslíku a 1 l/min dusíku	U	U_{odp}	U_{ef}	I_{odp}	I_{ef}
Frekvence (kHz)	kV	V	V	A	A
11,111	3,04	0,39	0,276	0,015	0,010
10,526	3,32	0,59	0,417	0,022	0,016
10,000	3,48	0,61	0,431	0,023	0,016
9,090	3,8	0,78	0,552	0,029	0,021
8,333	3,72	0,82	0,580	0,031	0,022
Vzduch ve složení 3 l/min kyslíku a 0,5 l/min dusíku	U	U_{odp}	U_{ef}	I_{odp}	I_{ef}
Frekvence (kHz)	kV	V	V	A	A
11,111	3,2	0,39	0,276	0,015	0,010
10,526	3,2	0,48	0,339	0,018	0,013
10,000	3,32	0,61	0,431	0,023	0,016
9,090	3,56	0,62	0,438	0,023	0,016
8,333	3,68	0,81	0,573	0,030	0,022

Dále byl vypočítán střední výkon na odporu pomocí rovnice (4.2) a okamžitý výkon na odporu (maximální výkon) v čase 5 μs pomocí rovnice (4.3) a hodnoty zapsány do tab. 4.2 a sestaveny závislosti efektivního napětí na odporu, efektivního proudu, okamžitého výkonu a středního výkonu na změně složení plyné směsi. Závislosti jsou zobrazeny na obr. 4.3 až obr. 4.6 pro frekvenci 8,333 kHz, pro ostatní frekvence jsou v Příloze B.

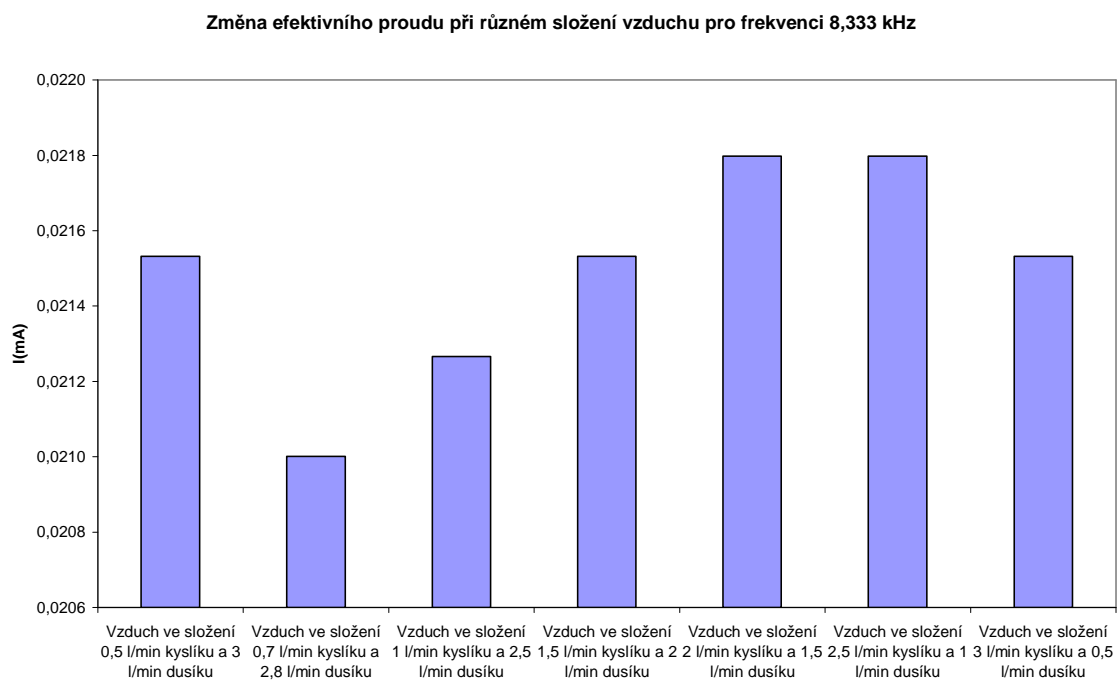
$$P = U_{ef} I_{ef} \cos \varphi, \quad (4.2)$$

$$p(t) = u(t)i(t), \quad (4.3)$$

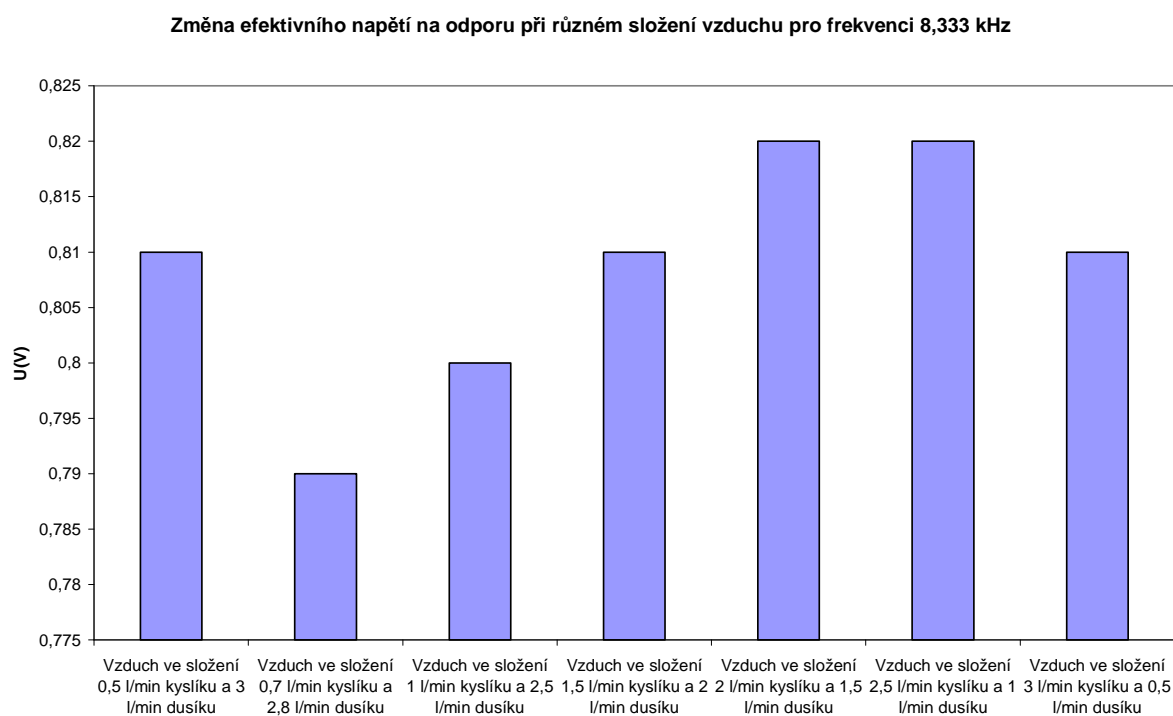
Tab. 4.2 Tabulka vypočtených hodnot na odporu

	Střední výkon	Okamžitý výkon (t=5 μs)
Vzduch ve složení 0,5 l/min kyslíku a 3 l/min dusíku	P	p
Frekvence (kHz)	mW	mW
11,111	3,316	6,632
10,526	4,889	9,778
10,000	7,226	14,451
9,090	7,942	15,883
8,333	12,333	24,665

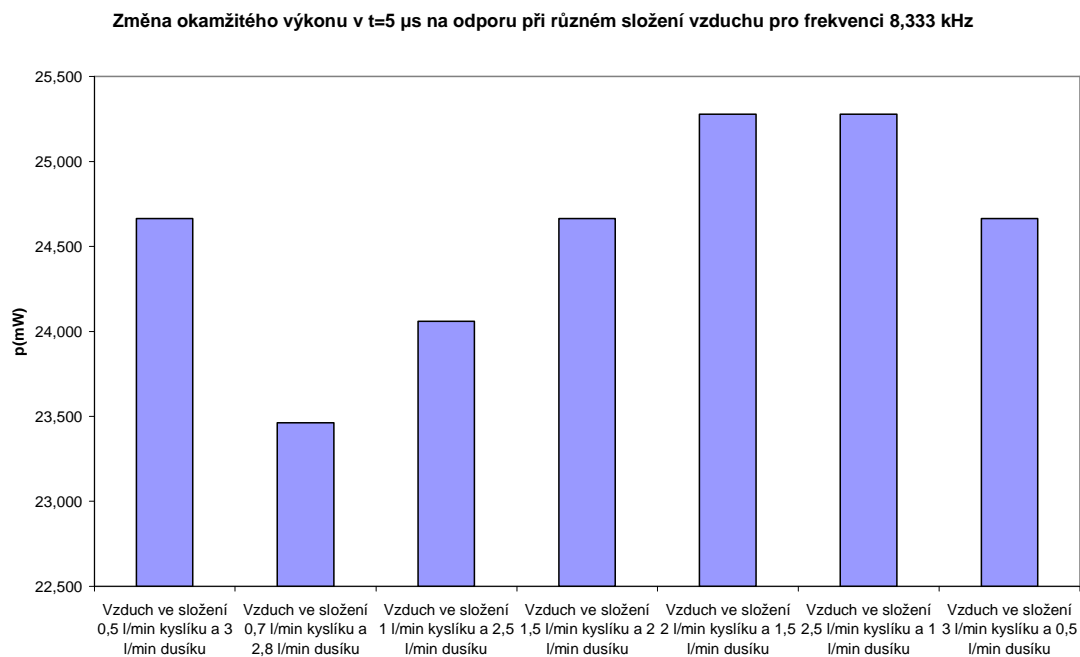
Vzduch ve složení 0,7 l/min kyslíku a 2,8 l/min dusíku	P	p
Frekvence (kHz)	mW	mW
11,111	3,316	6,632
10,526	3,476	6,951
10,000	7,226	14,451
9,090	6,994	13,989
8,333	11,731	23,462
Vzduch ve složení 1 l/min kyslíku a 2,5 l/min dusíku	P	p
Frekvence (kHz)	mW	mW
11,111	2,859	5,718
10,526	3,160	6,320
10,000	7,226	14,451
9,090	6,994	13,989
8,333	12,030	24,060
Vzduch ve složení 1,5 l/min kyslíku a 2 l/min dusíku	P	p
Frekvence (kHz)	mW	mW
11,111	3,160	6,320
10,526	4,513	9,026
10,000	6,994	13,989
9,090	11,731	23,462
8,333	12,333	24,665
Vzduch ve složení 2 l/min kyslíku a 1,5 l/min dusíku	P	p
Frekvence (kHz)	mW	mW
11,111	2,859	5,718
10,526	4,889	9,778
10,000	6,543	13,086
9,090	11,436	22,872
8,333	12,639	25,278
Vzduch ve složení 2,5 l/min kyslíku a 1 l/min dusíku	P	p
Frekvence (kHz)	mW	mW
11,111	2,859	5,718
10,526	6,543	13,086
10,000	6,994	13,989
9,090	11,436	22,872
8,333	12,639	25,278
Vzduch ve složení 3 l/min kyslíku a 0,5 l/min dusíku	P	p
Frekvence (kHz)	mW	mW
11,111	2,859	5,718
10,526	4,331	8,662
10,000	6,994	13,989
9,090	7,226	14,451
8,333	12,333	24,665



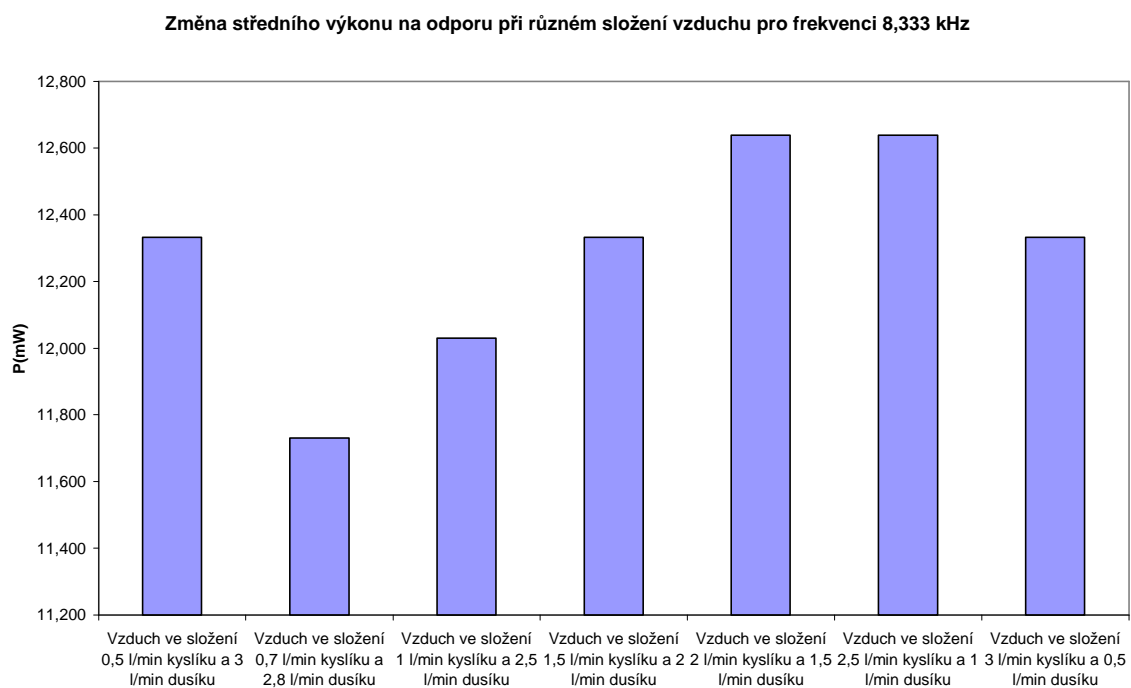
Obr. 4.3 Změna efektivního proudu při různém složení vzduchu pro frekvenci 8,333 kHz



Obr. 4.4 Změna efektivního napětí na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 8,333 kHz



Obr. 4.5 Změna okamžitého výkonu v $t=5 \mu s$ na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 8,333 kHz



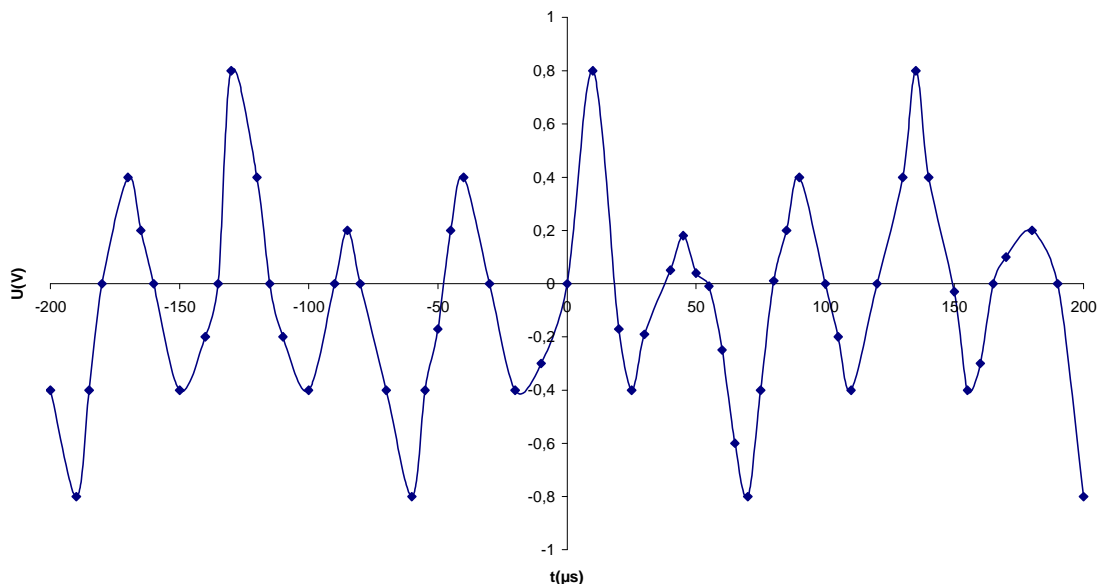
Obr. 4.6 Změna středního výkonu na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 8,333 kHz

Z grafů, které jsou zobrazeny na obr. 4.3 až obr. 4.6, je vidět, že složení nosného plynu nemá zásadní vliv na proudové poměry obvodu.

Časová závislost napětí, proudu a okamžitého výkonu na odporu

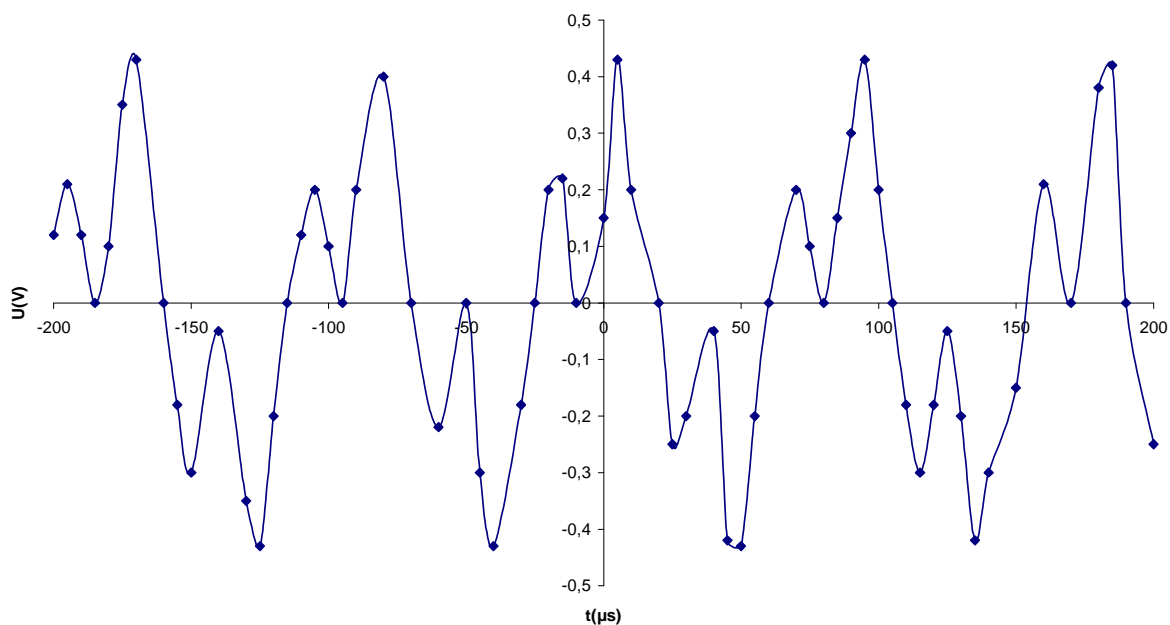
Pro složení vzduchu 1 l/min kyslíku a 2,5 l/min dusíku při frekvenci 8,333 kHz a 0,7 l/min kyslíku a 2,8 l/min dusíku při frekvenci 11,111 kHz byly sestaveny časové závislosti napětí na odporu obr. 4.7 a obr. 4.8, proudu obr. 4.9 a obr. 4.10 a výkonu na odporu obr. 4.11 a obr. 4.12.

Časová závislost napětí na odporu (vzduch ve složení 1 l/min kyslíku a 2,5 l/min dusíku při frekvenci 8,333 kHz)

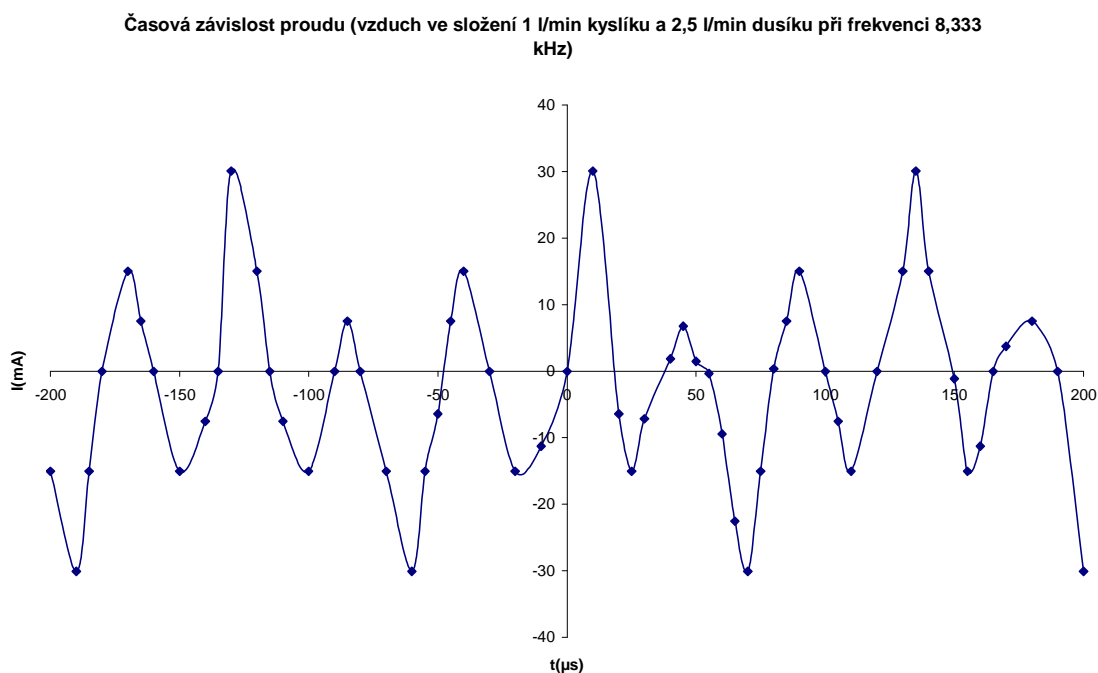


Obr. 4.7 Časová závislost napětí na odporu (vzduch ve složení 1 l/min kyslíku a 2,5 l/min dusíku při frekvenci 8,333 kHz)

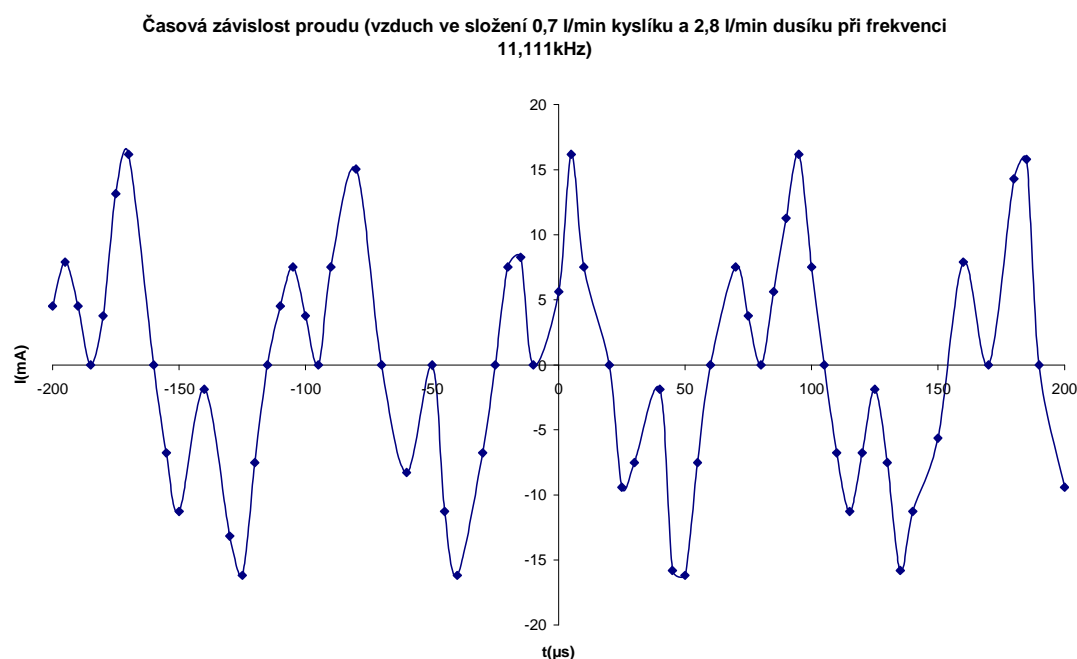
Časová závislost napětí na odporu (vzduch ve složení 0,7 l/min kyslíku a 2,8 l/min dusíku při frekvenci 11,111kHz)



Obr. 4.8 Časová závislost napětí na odporu (vzduch ve složení 0,7 l/min kyslíku a 2,8 l/min dusíku při frekvenci 11,111kHz)



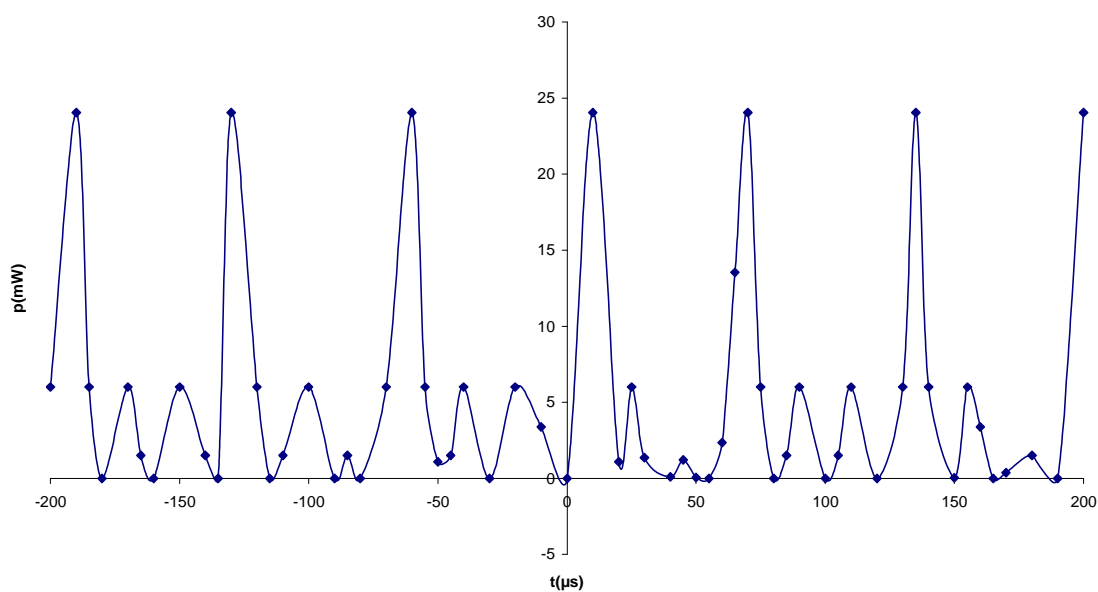
Obr. 4.9 Časová závislost proudu (vzduch ve složení 1 l/min kyslíku a 2,5 l/min dusíku při frekvenci 8,333 kHz)



Obr. 4.10 Časová závislost proudu (vzduch ve složení 0,7 l/min kyslíku a 2,8 l/min dusíku při frekvenci 11,111kHz)

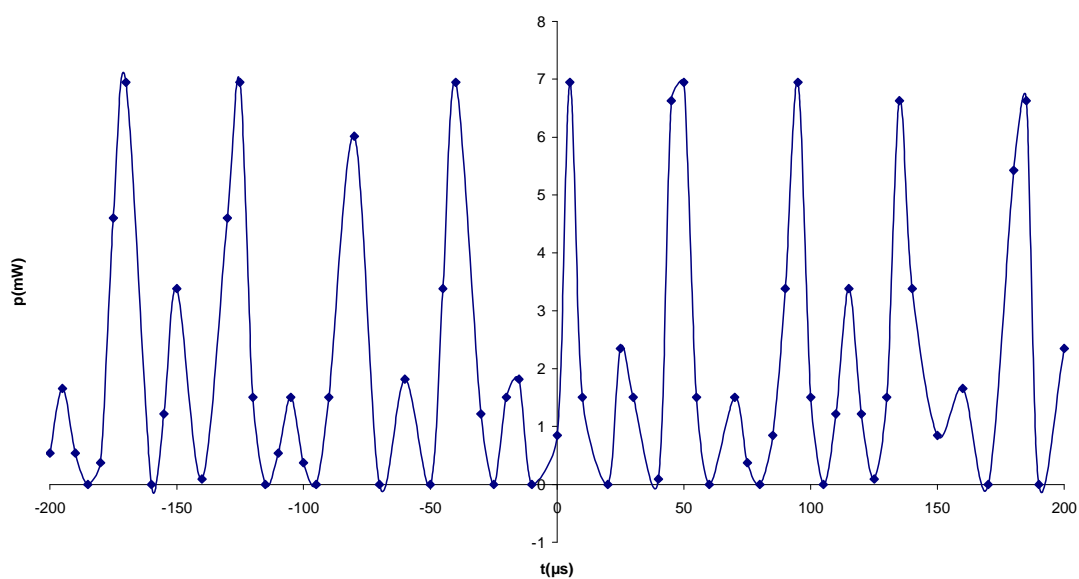
Při maximálních záporných proudových a napěťových hodnotách nejsou zachyceny pulzy proudu odpovídající filamentům ve výboji, z důvodu špatné čitelnosti z osciloskopu.

Časová závislost výkonu na odporu (vzduch ve složení 1 l/min kyslíku a 2,5 l/min dusíku při frekvenci 8,333 kHz)



Obr. 4.11 Časová závislost výkonu na odporu (vzduch ve složení 1 l/min kyslíku a 2,5 l/min dusíku při frekvenci 8,333 kHz)

Časová závislost výkonu na odporu (vzduch ve složení 0,7 l/min kyslíku a 2,8 l/min dusíku při frekvenci 11,111kHz)

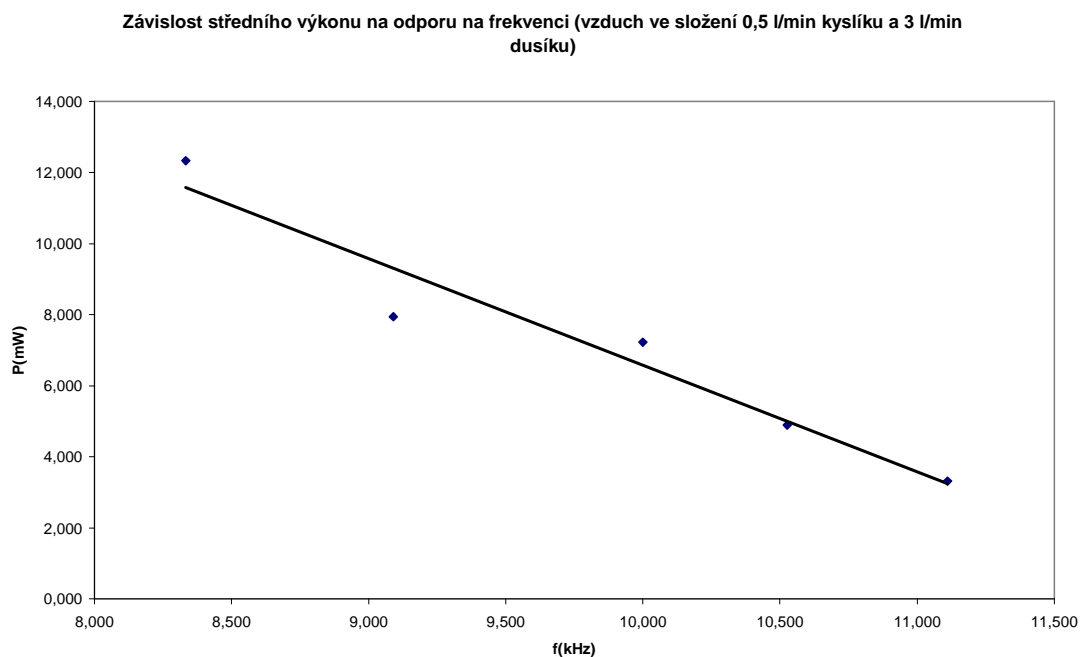


Obr. 4.12 Časová závislost výkonu na odporu (vzduch ve složení 0,7 l/min kyslíku a 2,8 l/min dusíku při frekvenci 11,111kHz)

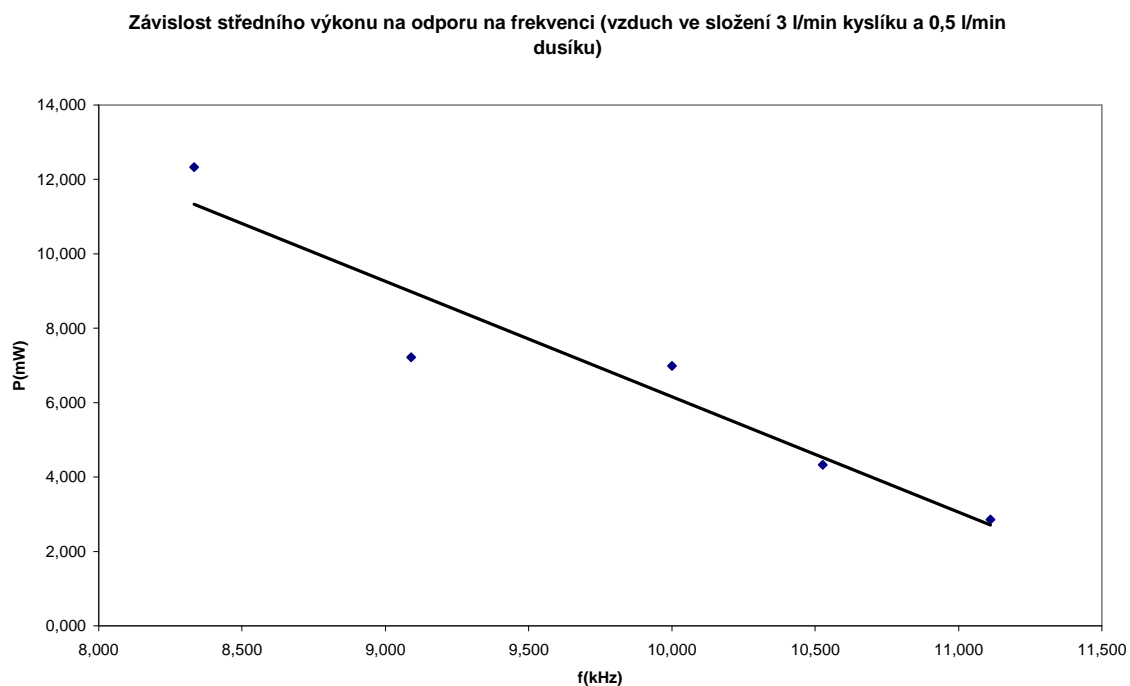
Je vidět, že při nižší frekvenci je vždy větší výkonový puls a pak dva menší, zatímco u vyšší frekvence je mezi nimi jen jeden.

Závislost středního výkonu na odporu na frekvenci

Pro složení vzduchu 0,5 l/min kyslíku a 3 l/min dusíku a 3 l/min kyslíku a 0,5 l/min dusíku byly sestavena závislost středního výkonu na frekvenci obr. 4.13 a obr. 4.14.



Obr. 4.13 Závislost středního výkonu na odporu na frekvenci (vzduch ve složení 0,5 l/min kyslíku a 3 l/min dusíku)



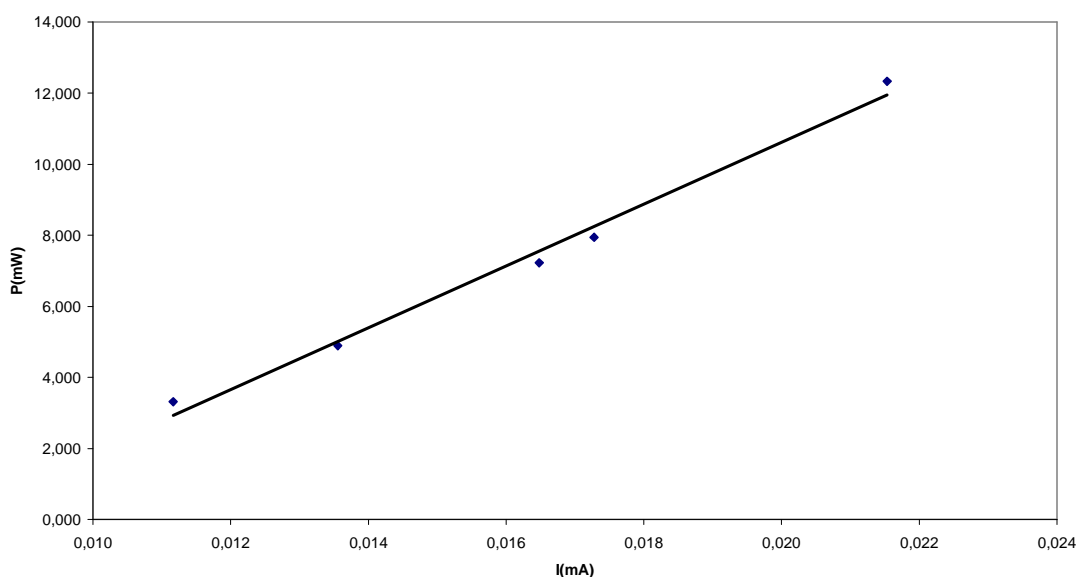
Obr. 4.14 Závislost středního výkonu na odporu na frekvenci (vzduch ve složení 3 l/min kyslíku a 0,5 l/min dusíku)

Z charakteristik jde vidět, že výkon s vzrůstající frekvencí klesá lineárně.

Závislost středního výkonu na odporu na efektivním proudu

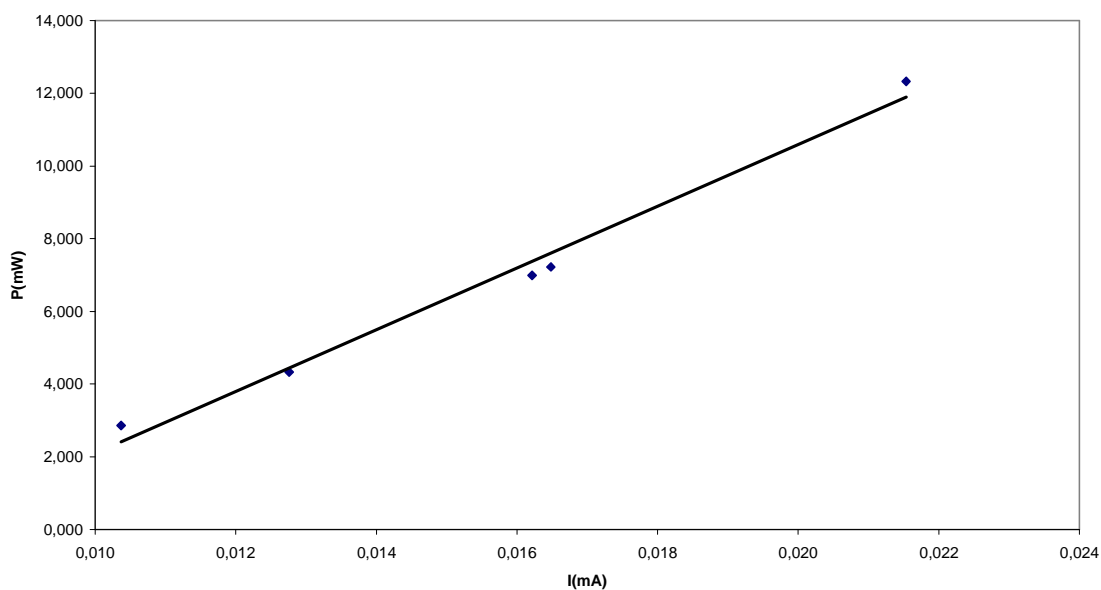
Pro složení vzduchu 0,5 l/min kyslíku a 3 l/min dusíku a 3 l/min kyslíku a 0,5 l/min dusíku byly sestavena závislost středního výkonu na odporu na efektivním proudu obr. 4.15 a obr. 4.16.

Závislost středního výkonu na odporu na efektivním proudu (vzduch ve složení 0,5 l/min kyslíku a 3 l/min dusíku)



Obr. 4.15 Závislost středního výkonu na odporu na efektivním proudu (vzduch ve složení 0,5 l/min kyslíku a 3 l/min dusíku)

Závislost středního výkonu na odporu na efektivním proudu (vzduch ve složení 3 l/min kyslíku a 0,5 l/min dusíku)



Obr. 4.16 Závislost středního výkonu na odporu na efektivním proudu (vzduch ve složení 3 l/min kyslíku a 0,5 l/min dusíku)

Z grafů vyplývá, že s rostoucím proudem střední výkon roste lineárně.

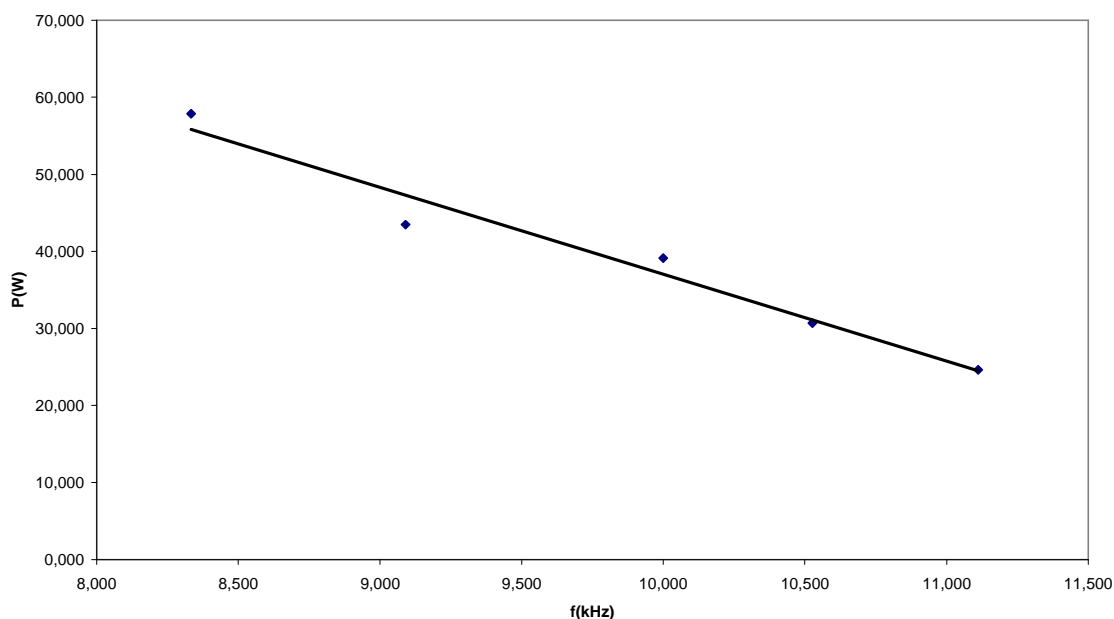
Výpočet výkonu zdroje, závislost výkonu zdroje na frekvenci (kalibrační křivka)

Podle rovnice (4.2) byl vypočítán výkon zdroje, kde za napětí se dosazuje efektivní napětí VN. Výsledky jsou zapsány v tab. 4.3 a napětí a proud byl použit z měření, kde byl vzduch ve složení 0,5 l/min kyslíku a 3 l/min dusíku. Podle vypočtených hodnot byla sestavena závislost výkonu zdroje na frekvenci obr. 4.17.

Tab. 4.3 Tabulka vypočtených hodnot

Vzduch ve složení 0,5 l/min kyslíku a 3 l/min dusíku	Výkon zdroje
Frekvence (kHz)	P(W)
11,111	24,632
10,526	30,677
10,000	39,158
9,090	43,496
8,333	57,857

Závislost výkonu zdroje na frekvenci



Obr. 4.17 Závislost výkonu zdroje na frekvenci

Ze závislosti vyplývá, že výkon zdroje klesá lineárně s vzrůstající frekvencí. Rovnice regrese kalibrační křivky je popsána rovnicí (4.4) a hodnota spolehlivosti je $R^2 = 0,9643$.

$$y = -11,275x + 149,8 \quad (4.4)$$

Výpočet hustoty energie v reaktoru

Elektroda tj. elektrická část má rozměry 80x80 mm, vzdálenost mezi elektrodou a krycí deskou je 2 mm. Hustota energie se vypočítá pomocí vzorce (4.5). Výkon zdroje je při složení vzduchu 0,5 l/min kyslíku a 3 l/min dusíku. Vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tab. 4.4.

$$W = \frac{P}{V}, \quad (4.5)$$

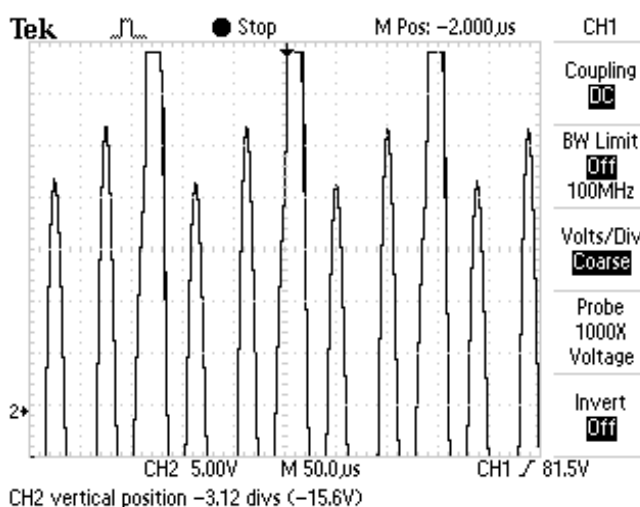
Tab. 4.4 Tabulka vypočtených hodnot

Vzduch ve složení 0,5 l/min kyslíku a 3 l/min dusíku	Výkon zdroje	Hustota energie
Frekvence (kHz)	P(W)	W (W/cm ³)
11,111	24,632	2,199
10,526	30,677	2,739
10,000	39,158	3,496
9,090	43,496	3,884
8,333	57,857	5,166

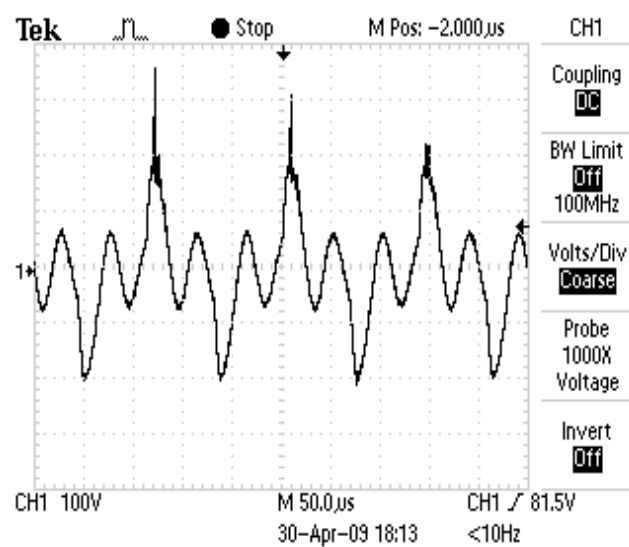
Výboj hoří do vzdálenosti 0,5 mm nad vrstvou. Ve výbojové vrstvě je tedy hustota energie přibližně 4x větší.

4.2 Měření na kondenzátoru

Cílem měření bylo změřením napětí mezi dielektrikem a napětí na kondenzátoru, který měl kapacitu 46 pF. Kapacita samostatného elektrodového systému byla změřena a její hodnota je 42 nF. Měření napětí na kondenzátoru probíhalo pomocí napěťové sondy s dělicím poměrem 1:10 se vstupní kapacitou 49 pF, která značně ovlivňovala měření a zanášela velké chyby do měření. Proto bude nutné sestavení jiného zapojení, ve kterém budou kapacity sond zahrnuty, s tím se budu zabývat v další práci. Příklady změřených charakteristik jsou zobrazeny na obr. 4.18 a obr. 4.19.



Obr. 4.18 Příklad měření na kondenzátoru



Obr. 4.19 Příklad měření na kondenzátoru

5 Závěr

Cílem této práce bylo zaměřit se v první části na teoretické informace o elektrickém výboji, které posloužily v experimentální části. Měření bylo prováděno na přípravku, na kterém je nakonfigurován povrchový výboj, pomocí digitálního osciloskopu.

V teoretické části je popsán vznik výboje a jaké děje se v plazmatu uskutečňují. Dále jsou ukázány vlastnosti mezi rozhraním elektrodou a plazmatem, konkrétně děje u anodové a katodové oblasti. V poslední teoretické části je popsáno plazma výbojů a jeho typy. V této části jsou teoretické informace o povrchovém výboji, jeho vlastnosti a vznik. Je zde ukázán povrchový výboj, který probíhá na elektrodě sestavené doc. Krčmou z chemické fakulty VUT, kde se bude měření uskutečňovat.

V praktické části bylo pomocí odporu změřeno napětí a následně vypočítán proud, střední a okamžitý výkon. Z charakteristik se došlo k závěru, že změna složení nosného plynu nemá zásadní vliv na proudové poměry obvodu. Dále byla sestavena kalibrační křivka zdroje a bylo zjištěno, že závislost výkonu na frekvenci je lineární.

Měření pomocí kondenzátoru bude vyžadovat změnu zapojení, ve kterém budou zahrnuty kapacity sond, tím se budu zabývat v dalším studiu povrchového výboje.

Poznatky a výsledky budou využity při dalším zkoumání povrchového výboje a především k použití výboje k rozkladu organických látek, což je alternativa např. k chemickému čištění vody pomocí chlóru.

6 Literatura

- [1] GROSS, Boleslav. Elektrické výboje v plynech. 1. vyd. Praha : SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1967. 137 s.
- [2] REICHL, Jaroslav , VŠETIČKA, Martin . Encyklopedie fyziky [online]. c2006-2008 [cit. 2008-11-01]. Dostupný z WWW: <http://fyzika.jreichl.com/index.php> .
- [3] AFTANAS, Milan . Fyzika plazmatu [online]. [2007] [cit. 2008-11-28]. Dostupný z WWW: <http://atrey.karlin.mff.cuni.cz/~marble/d/?p=3> .
- [4] HNÁT, Michal . Vplyv nízkoenergetickej plazmy na povrchové vlastnosti dreva. Bratislava, 2005. 21 s. SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE. Semestrální práce.
- [5] VYHNALÍKOVÁ, Jana . Studium rozkladu těkavých uhlovodíků v nerovnovážném plazmatu povrchového výboje. Brno, 2008. 53 s. FCH VUT. Diplomová práce.
- [6] KRČMA, F.: Kinetic Processes in Nitrogen Post-Discharge Plasmas, VUTIUM Brno 2004, pages 1 – 40, Edice Habilitační a inaugurační spisy, svazek 132, ISSN 1213-418X, ISBN 80-214-2572-5.
- [7] KRČMA F., PROTASEVICH E. T.: Post-discharges in Pure Nitrogen and in Nitrogen Containing Halogenated Hydrocarbon Traces, Tomsk Polytechnic University Publishing, Tomsk 2003, pages 1 – 132, ISBN 189-8326-444.
- [8] KRČMA F.: Spectroscopic Studies of the Methane Traces Influence on the Nitrogen Afterglow, Ph.D. Thesis, Brno 1995, pages 1 – 210.

7 Použité symboly

n_o koncentrace částic

k Boltzmannova konstanta; $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$

T termodynamická teplota (K)

A práce (J)

e elementární náboj elektronu; $e = 1,6021892 \times 10^{-19} \text{ C}$

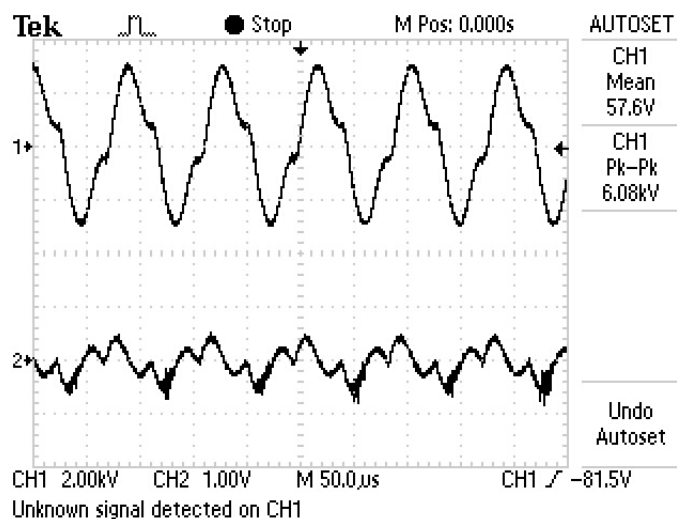
h Planckova konstanta; $h = 6,24176 \times 10^{-34} \text{ Js}$

E energie (J)

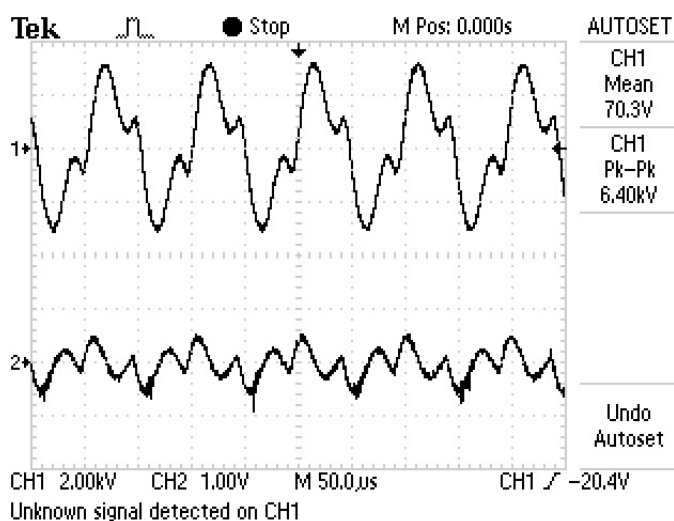
Q teplo (J)

8 Přílohy

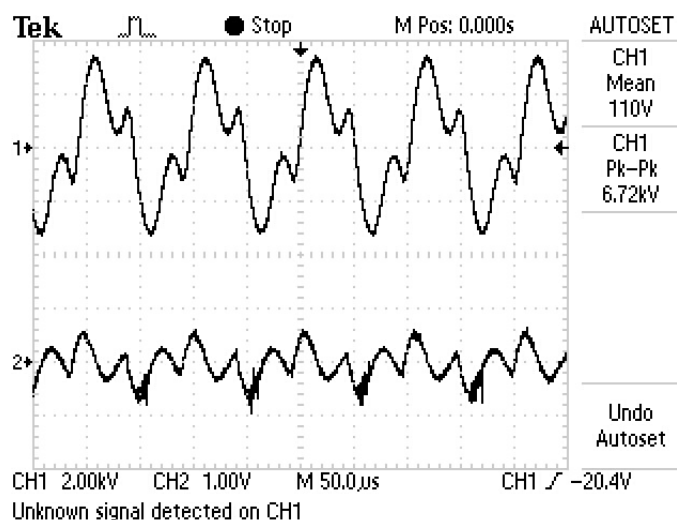
A Grafy z osciloskopu



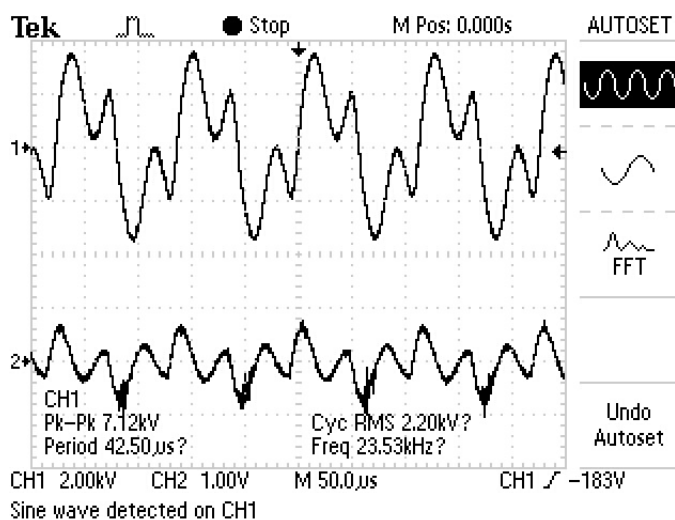
Obr. 8.1 Nosný plyn vzduch 0,5 l/min O_2 a 3 l/min N_2 - mísí se s toluenem při frekvenci 11,111 kHz



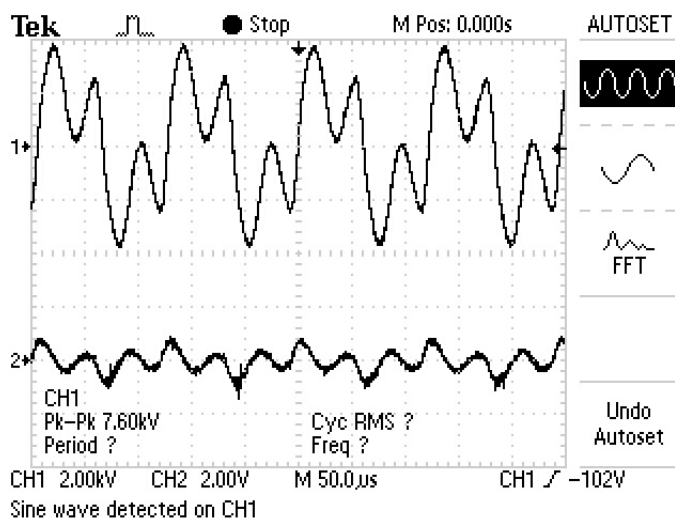
Obr. 8.2 Nosný plyn vzduch 0,5 l/min O_2 a 3 l/min N_2 - mísí se s toluenem při frekvenci 10,526 kHz



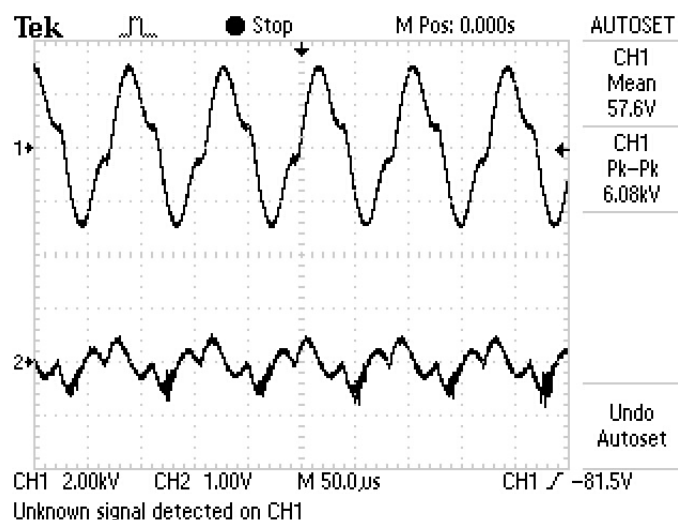
Obr. 8.3 Nosný plyn vzduch 0,5 l/min O₂ a 3 l/min N₂ - mísí se s toluenem při frekvenci 10 kHz



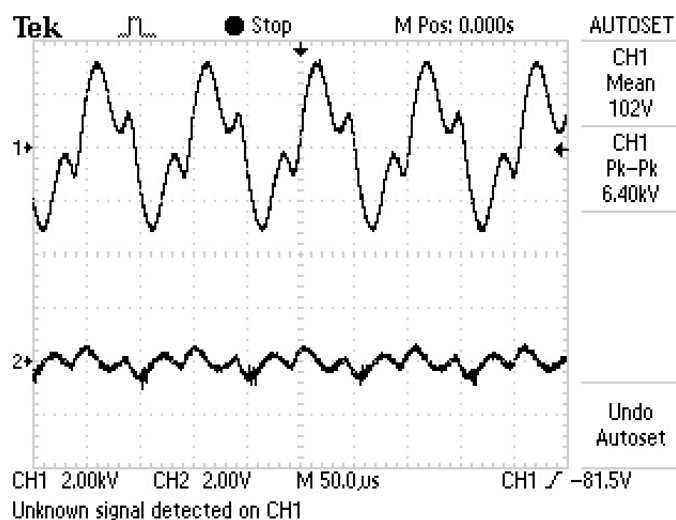
Obr. 8.4 Nosný plyn vzduch 0,5 l/min O₂ a 3 l/min N₂ - mísí se s toluenem při frekvenci 9,090 kHz



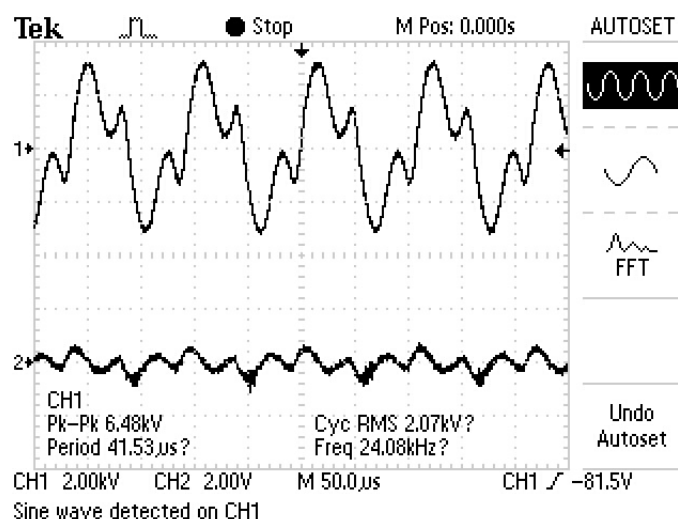
Obr. 8.5 Nosný plyn vzduch 0,5 l/min O₂ a 3 l/min N₂ - mísí se s toluenem při frekvenci 8,333 kHz



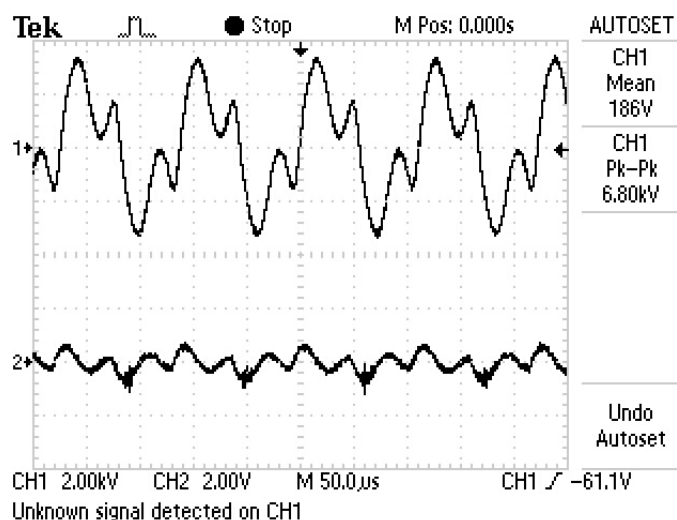
Obr. 8.6 Nosný plyn vzduch 0,7 l/min O₂ a 2,8 l/min N₂ - mísí se s toluenem při frekvenci 11,111 kHz



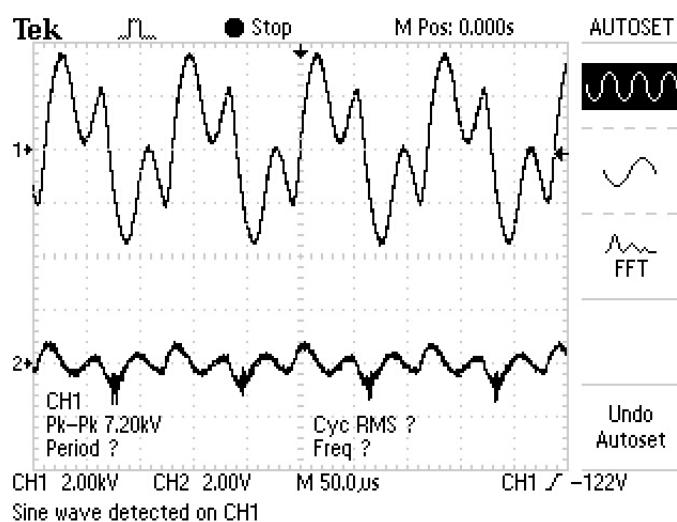
Obr. 8.7 Nosný plyn vzduch 0,7 l/min O₂ a 2,8 l/min N₂ - mísí se s toluenem při frekvenci 10,526 kHz



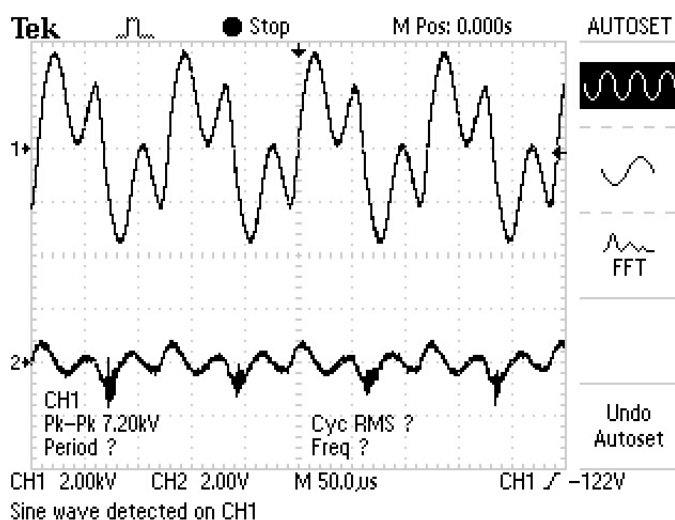
Obr. 8.8 Nosný plyn vzduch 0,7 l/min O₂ a 2,8 l/min N₂ - mísí se s toluenem při frekvenci 10 kHz



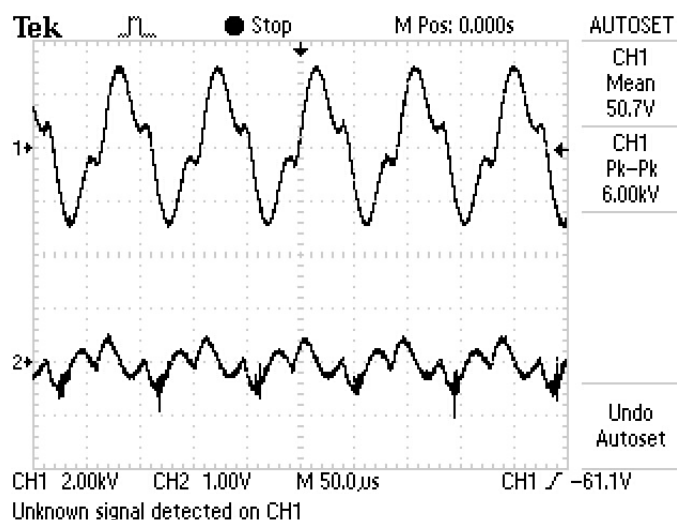
Obr. 8.9 Nosný plyn vzduch 0,7 l/min O₂ a 2,8 l/min N₂ - mísí se s toluenem při frekvenci 9,090 kHz



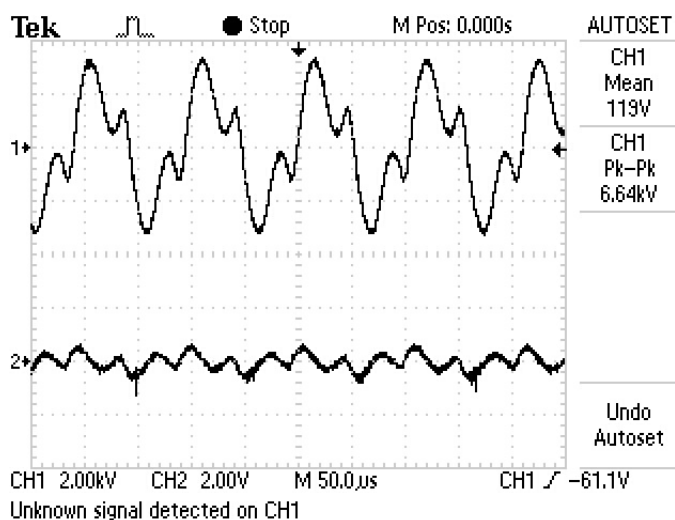
Obr. 8.10 Nosný plyn vzduch 0,7 l/min O₂ a 2,8 l/min N₂ - mísí se s toluenem při výkonu 8,333kHz



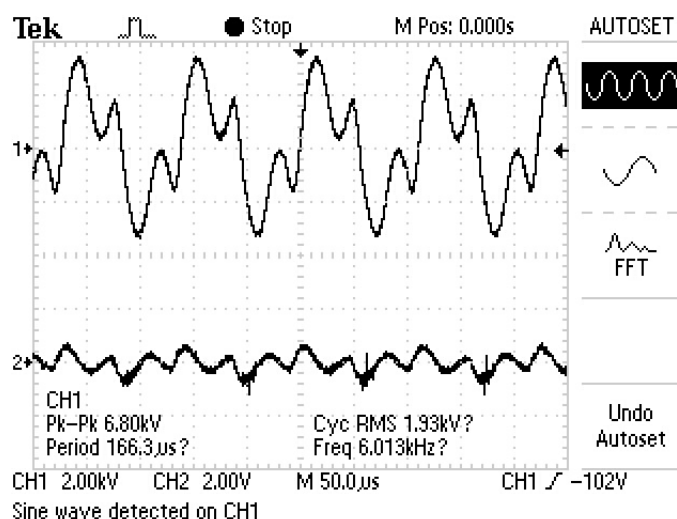
Obr. 8.11 Nosný plyn vzduch 1 l/min O₂ a 2,5 l/min N₂ - mísí se s toluenem při frekvenci 11,111 kHz



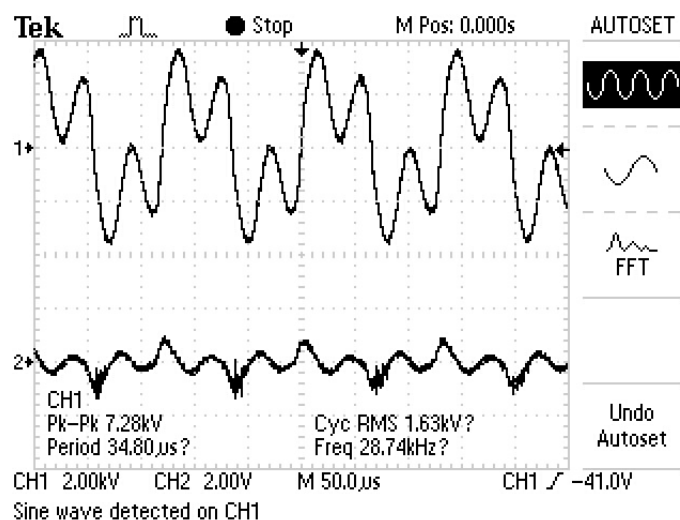
Obr. 8.12 Nosný plyn vzduch 1 l/min O_2 a 2,5 l/min N_2 - mísí se s toluenem při frekvenci 10,526 kHz



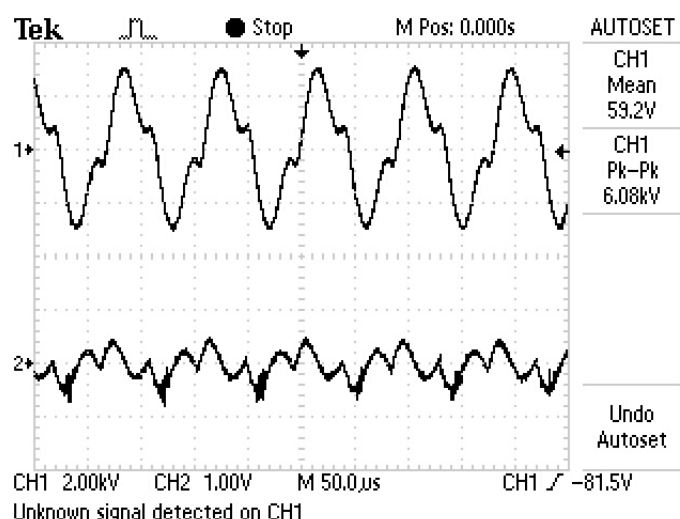
Obr. 8.13 Nosný plyn vzduch 1 l/min O_2 a 2,5 l/min N_2 - mísí se s toluenem při frekvenci 10 kHz



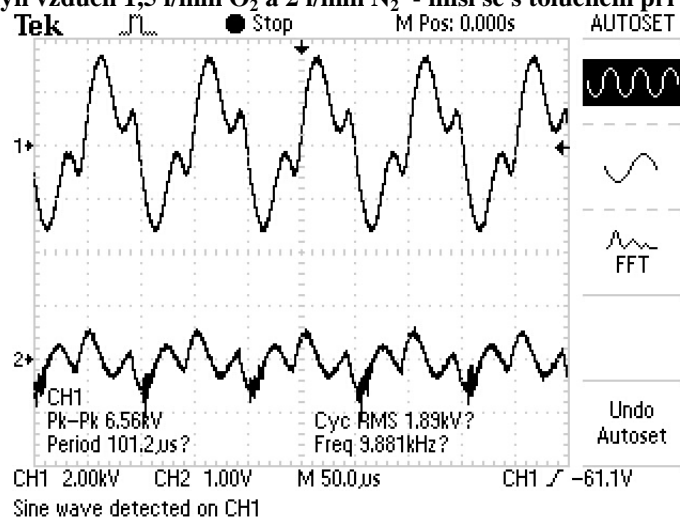
Obr. 8.14 Nosný plyn vzduch 1 l/min O_2 a 2,5 l/min N_2 - mísí se s toluenem při frekvenci 9,090 kHz



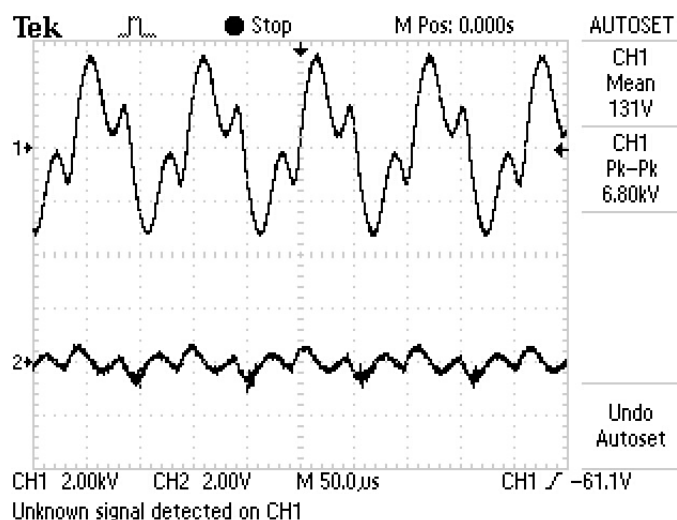
Obr. 8.15 Nosný plyn vzduch 1 l/min O₂ a 2,5 l/min N₂ – mísí se s toluenem při frekvenci 8,333 kHz



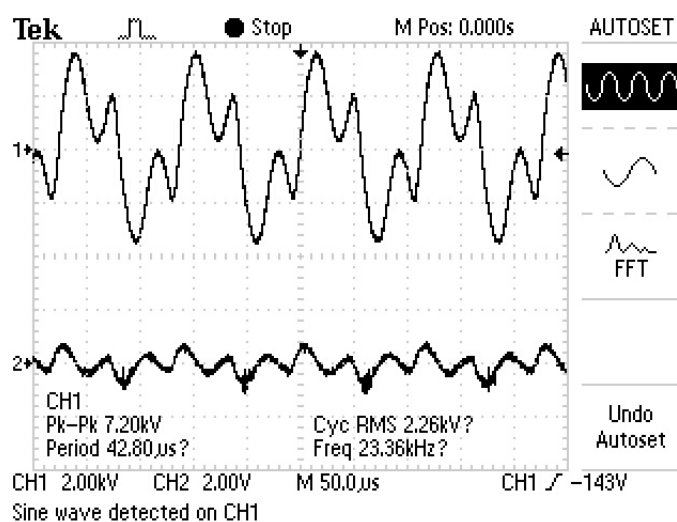
Obr. 8.16 Nosný plyn vzduch 1,5 l/min O₂ a 2 l/min N₂ - mísí se s toluenem při frekvenci 11,111 kHz



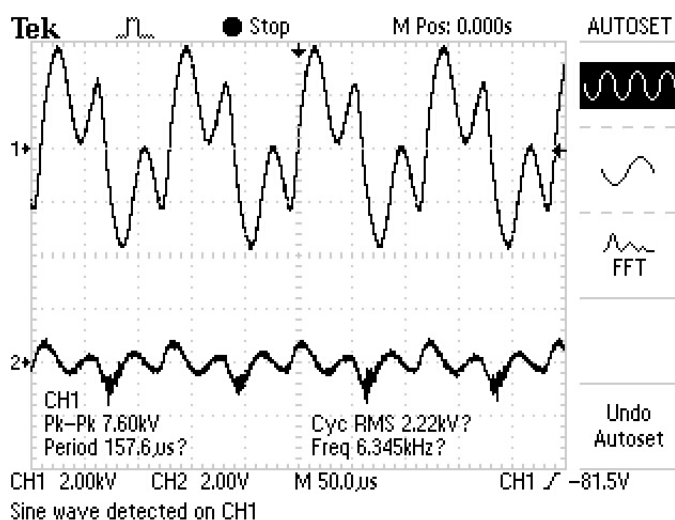
Obr. 8.17 Nosný plyn vzduch 1,5 l/min O₂ a 2 l/min N₂ - mísí se s toluenem při frekvenci 10,526 kHz



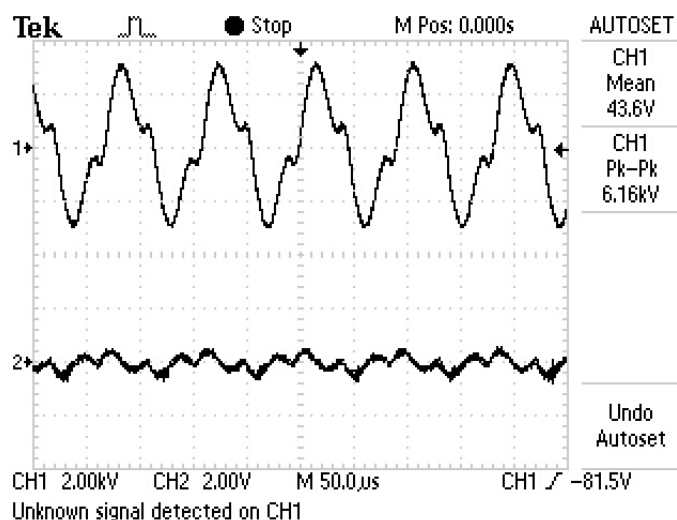
Obr. 8.18 Nosný plyn vzduch 1,5 l/min O_2 a 2 l/min N_2 - mísí se s toluenem při frekvenci 10 kHz



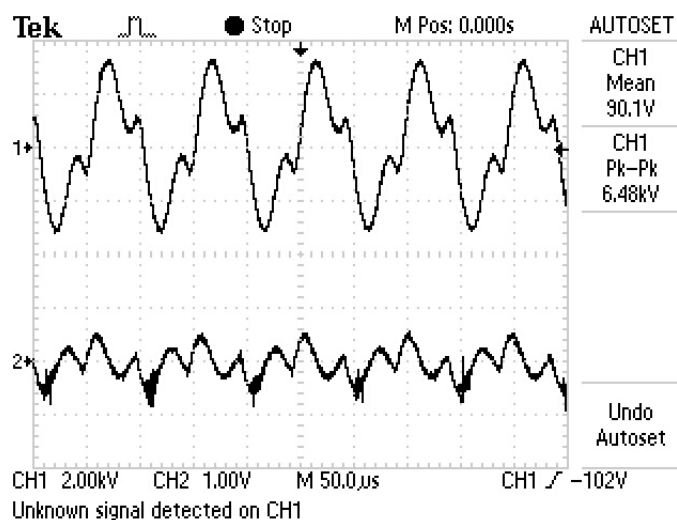
Obr. 8.19 Nosný plyn vzduch 1,5 l/min O_2 a 2 l/min N_2 - mísí se s toluenem při frekvenci 9,090 kHz



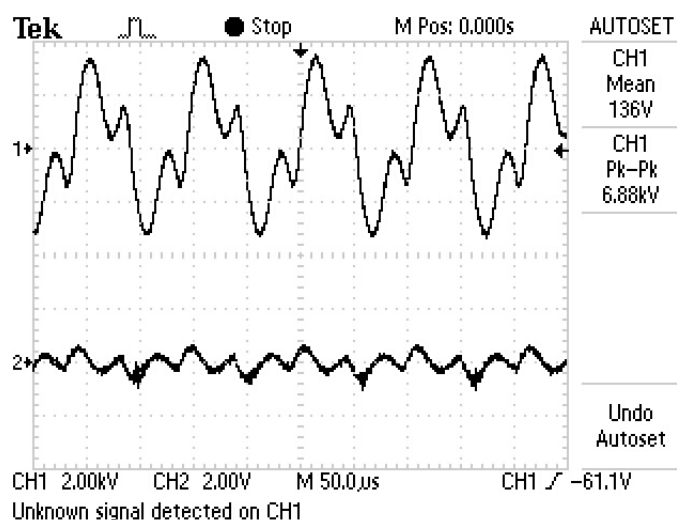
Obr. 8.20 Nosný plyn vzduch 1,5 l/min O_2 a 2 l/min N_2 - mísí se s toluenem při frekvenci 8,333 kHz



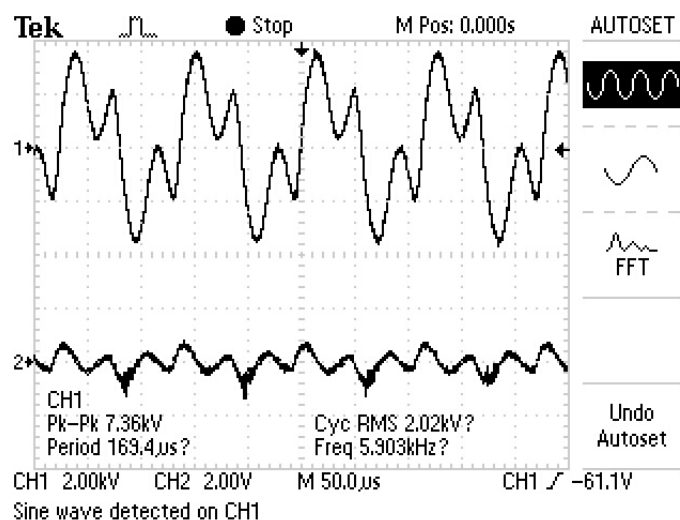
Obr. 8.21 Nosný plyn vzduch 2 l/min O₂ a 1,5 l/min N₂ - mísí se s toluenem při frekvenci 11,111 kHz



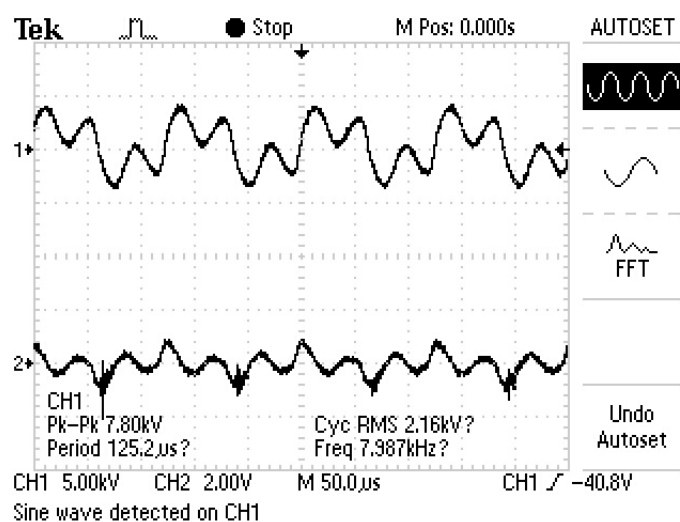
Obr. 8.22 Nosný plyn vzduch 2 l/min O₂ a 1,5 l/min N₂ - mísí se s toluenem při frekvenci 10,526 kHz



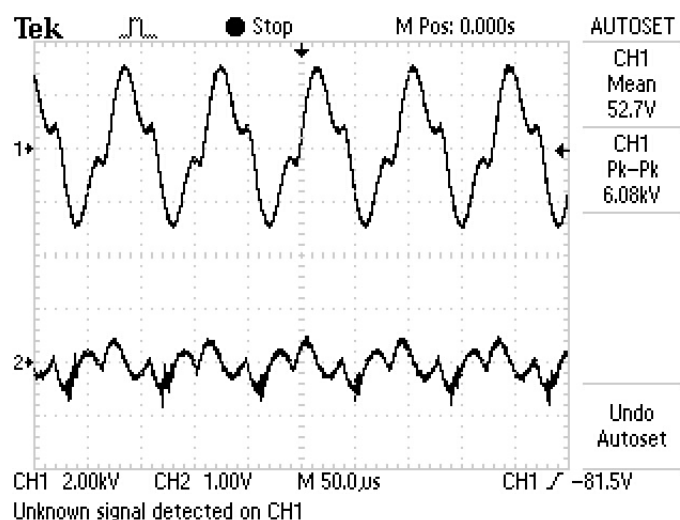
Obr. 8.23 Nosný plyn vzduch 2 l/min O₂ a 1,5 l/min N₂ - mísí se s toluenem při frekvenci 10 kHz



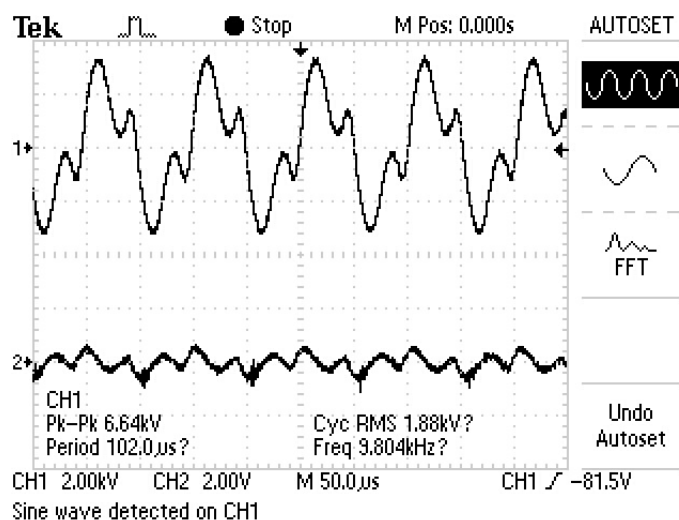
Obr. 8.24 Nosný plyn vzduch 2 l/min O₂ a 1,5 l/min N₂ - mísí se s toluenem při frekvenci 9,090 kHz



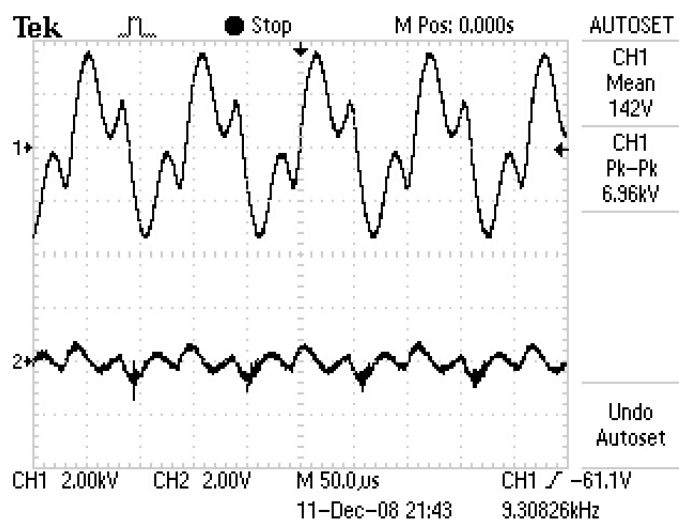
Obr. 8.25 Nosný plyn vzduch 2 l/min O₂ a 1,5 l/min N₂ - mísí se s toluenem při frekvenci 8,333 kHz



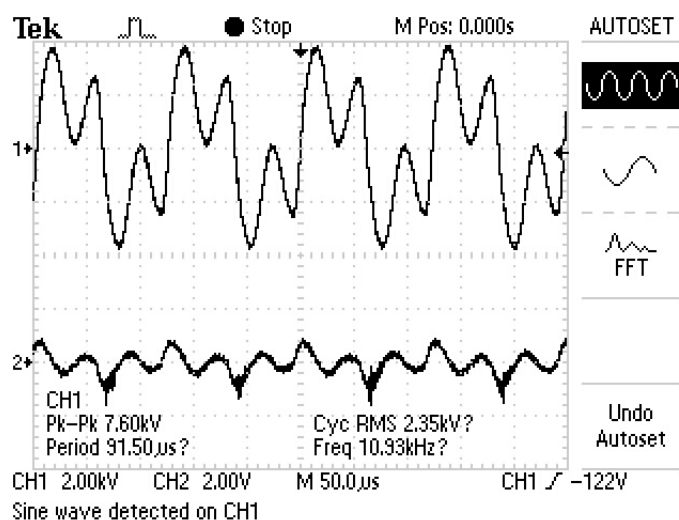
Obr. 8.26 Nosný plyn vzduch 2,5 l/min O₂ a 1 l/min N₂ - mísí se s toluenem při frekvenci 11,111 kHz



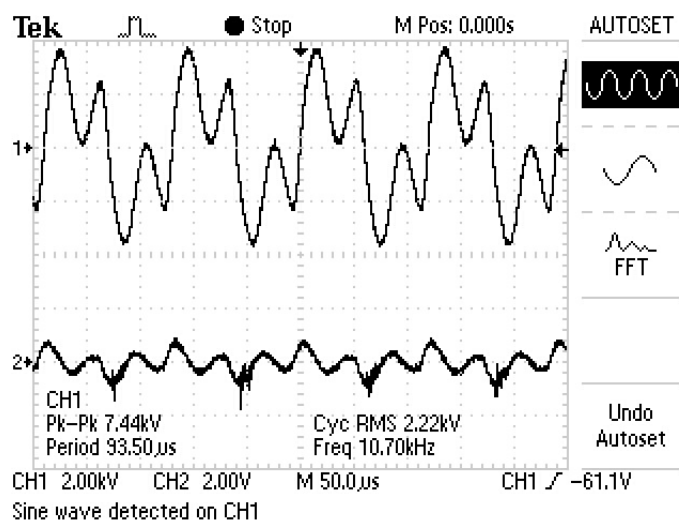
Obr. 8.27 Nosný plyn vzduch 2,5 l/min O₂ a 1 l/min N₂ - mísí se s toluenem při frekvenci 10,526 kHz



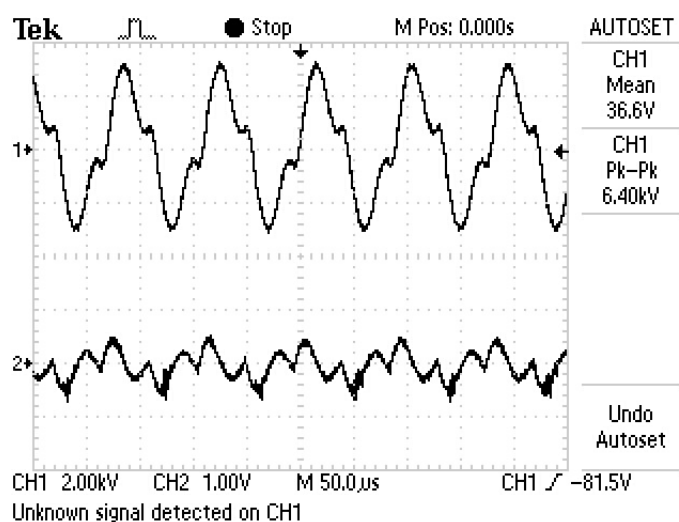
Obr. 8.28 Nosný plyn vzduch 2,5 l/min O₂ a 1 l/min N₂ - mísí se s toluenem při frekvenci 10 kHz



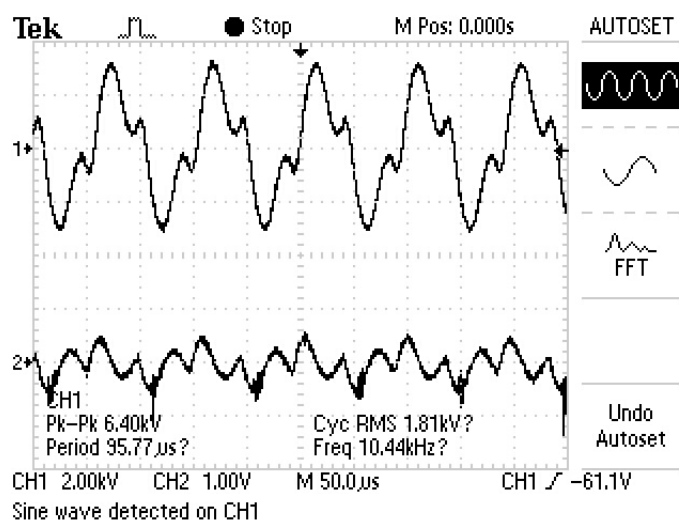
Obr. 8.29 Nosný plyn vzduch 2,5 l/min O₂ a 1 l/min N₂ - mísí se s toluenem při frekvenci 9,090 kHz



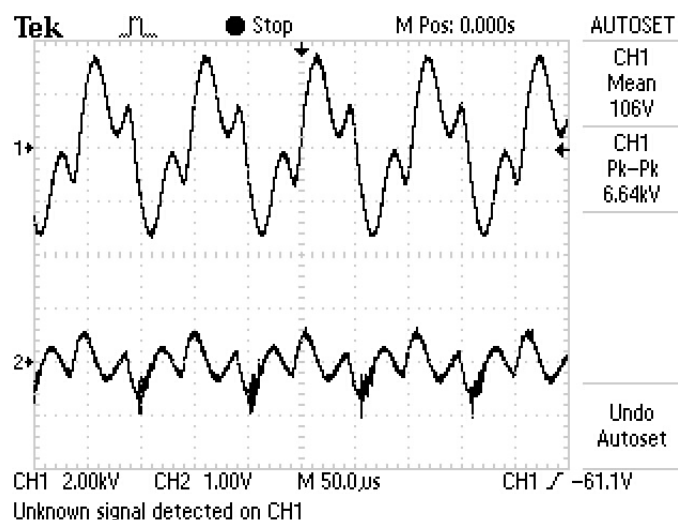
Obr. 8.30 Nosný plyn vzduch 2,5 l/min O₂ a 1 l/min N₂ - mísí se s toluenem při frekvenci 8,333 kHz



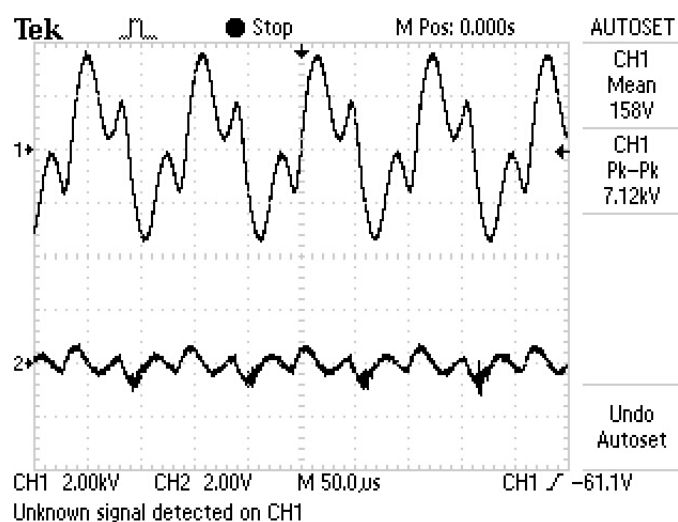
Obr. 8.31 Nosný plyn vzduch 3 l/min O₂ a 0,5 l/min N₂ - mísí se s toluenem při frekvenci 11,111 kHz



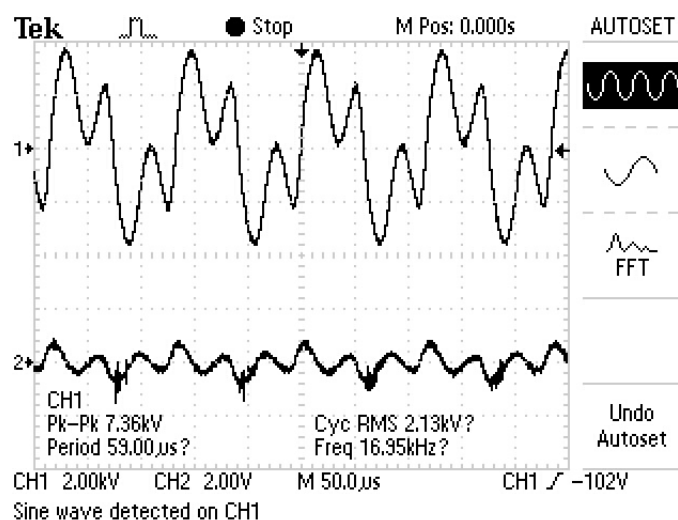
Obr. 8.32 Nosný plyn vzduch 3 l/min O₂ a 0,5 l/min N₂ - mísí se s toluenem při frekvenci 10,526 kHz



Obr. 8.33 Nosný plyn vzduch 3 l/min O_2 a 0,5 l/min N_2 - mísí se s toluenem při 10 kHz

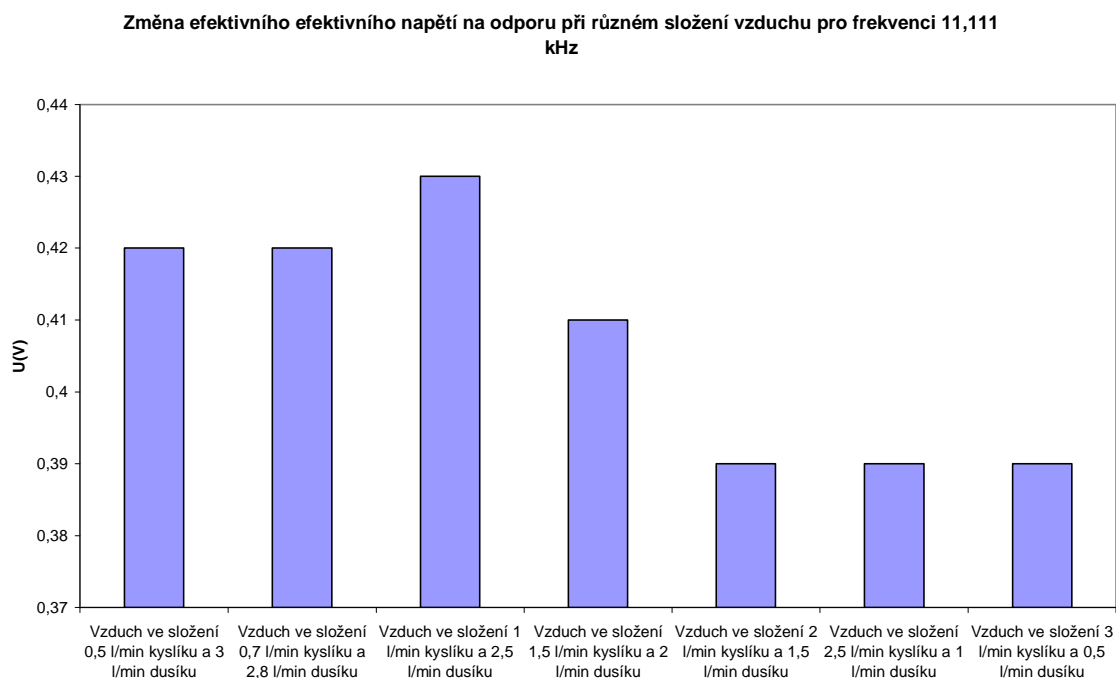


Obr. 8.34 Nosný plyn vzduch 3 l/min O_2 a 0,5 l/min N_2 - mísí se s toluenem při frekvenci 9,090 kHz

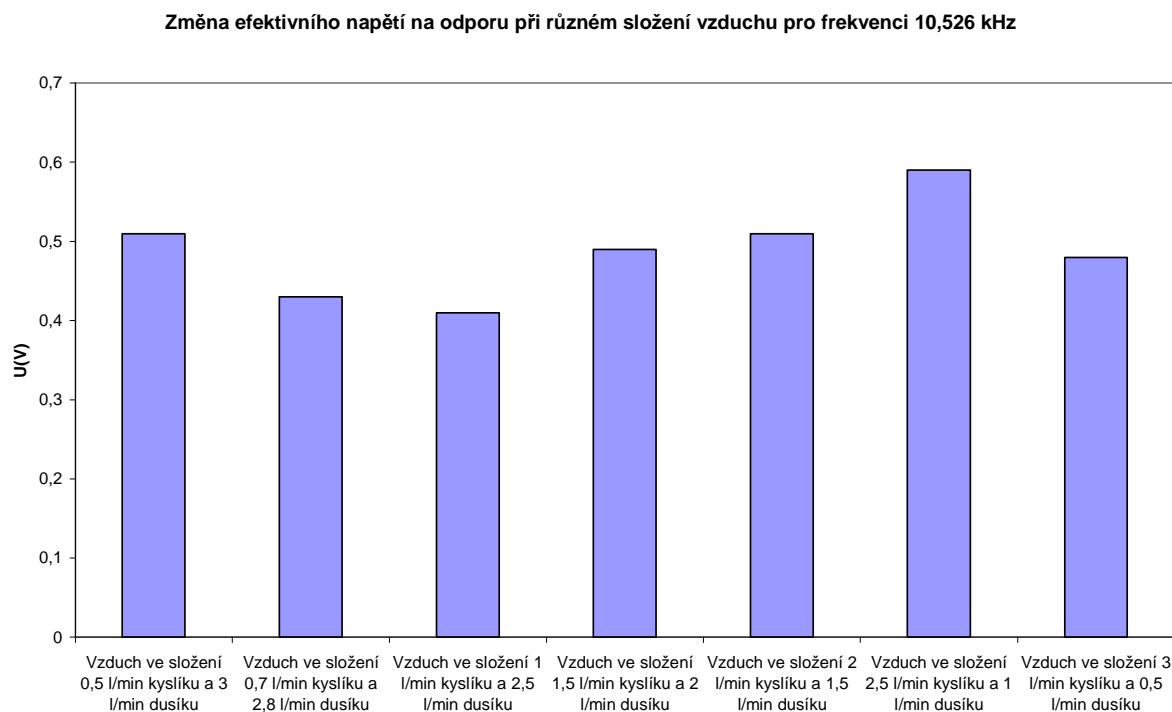


Obr. 8.35 Nosný plyn vzduch 3 l/min O_2 a 0,5 l/min N_2 - mísí se s toluenem při frekvenci 8,333 kHz

B Závislosti efektivního napětí na odporu, efektivního proudu, okamžitého a středního výkonu při změně složení vzduchu

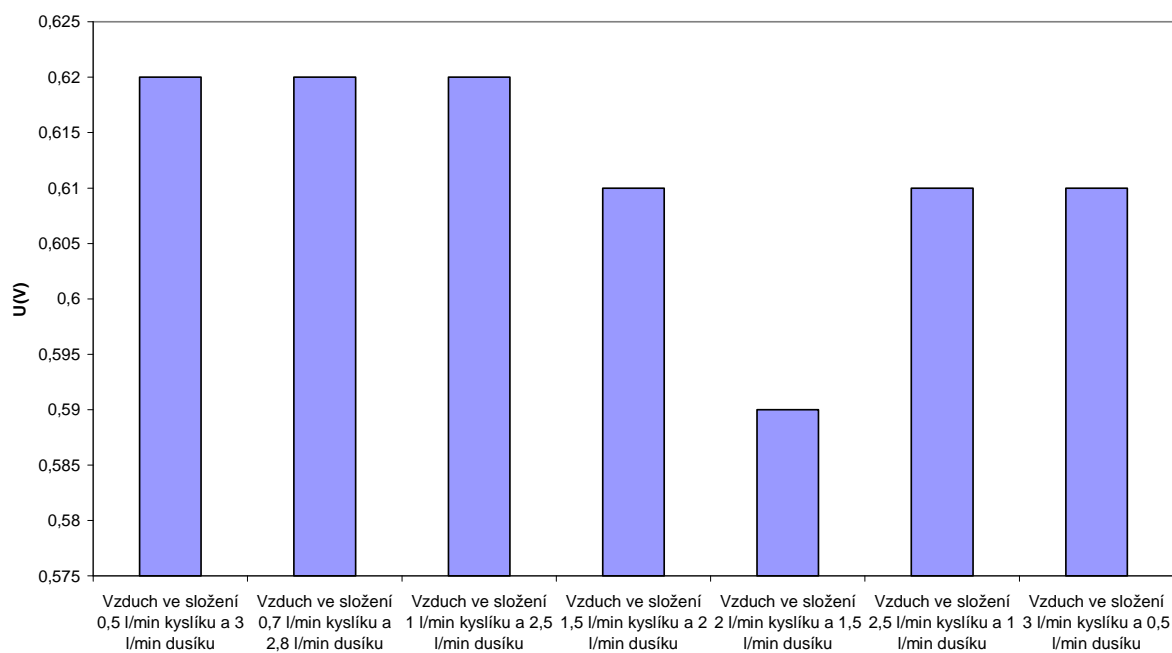


Obr. 8.36 Změna efektivního napětí na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 11,111 kHz



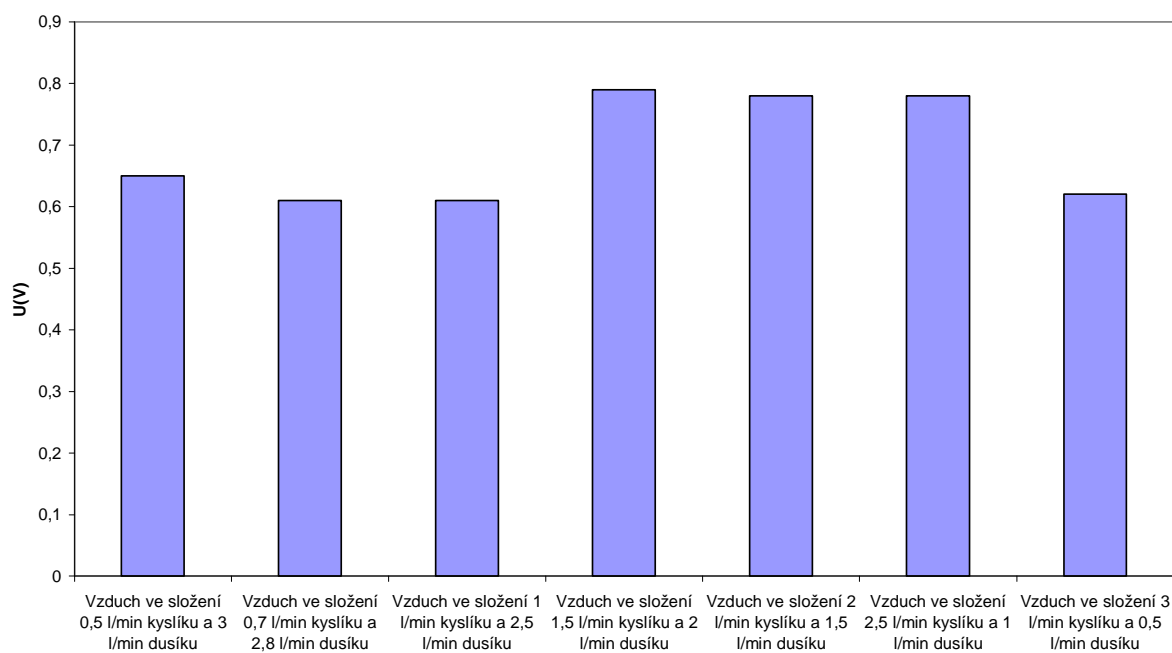
Obr. 8.37 Změna efektivního napětí na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 10,526 kHz

Změna efektivního napětí na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 10 kHz

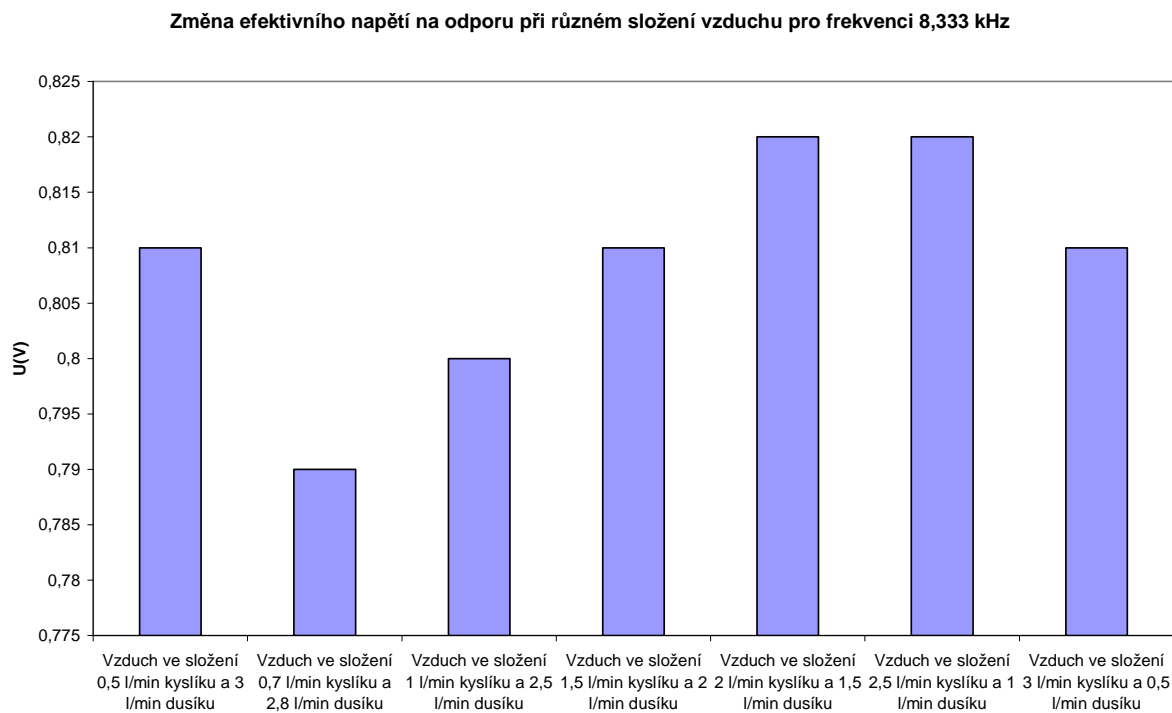


Obr. 8.38 Změna efektivního napětí na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 10 kHz

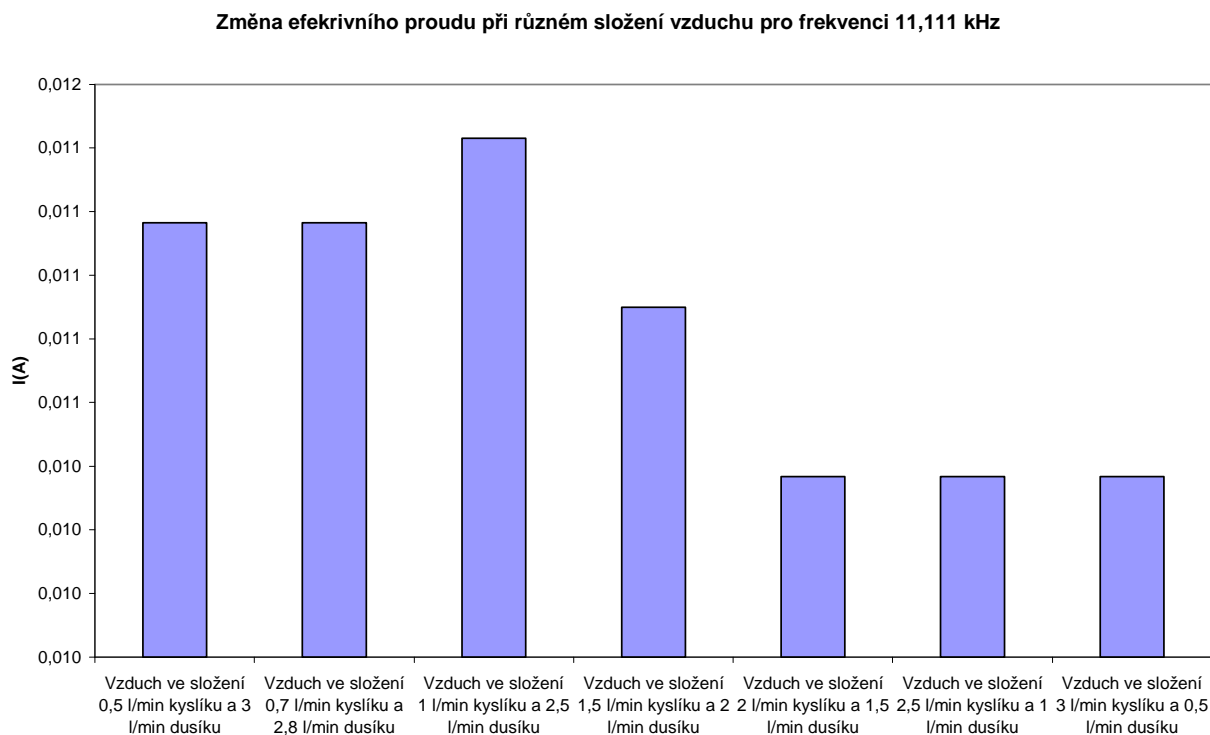
Změna efektivního napětí na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 9,090 kHz



Obr. 8.39 Změna efektivního napětí na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 9,090 kHz

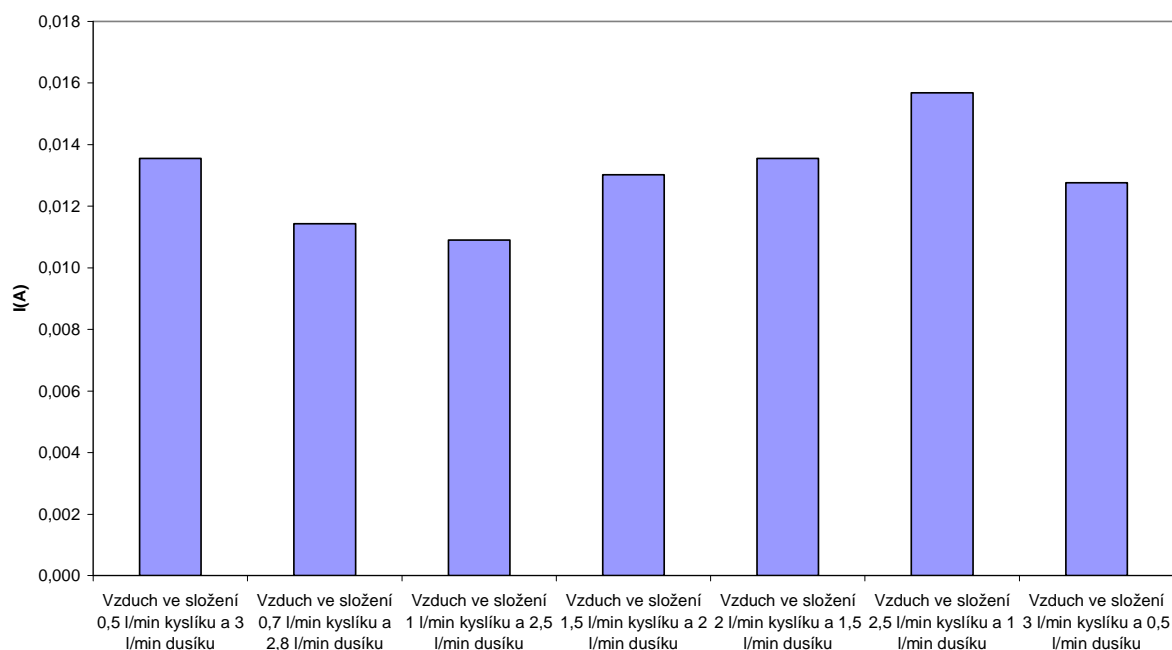


Obr. 8.40 Změna efektivního napětí na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 8,333 kHz



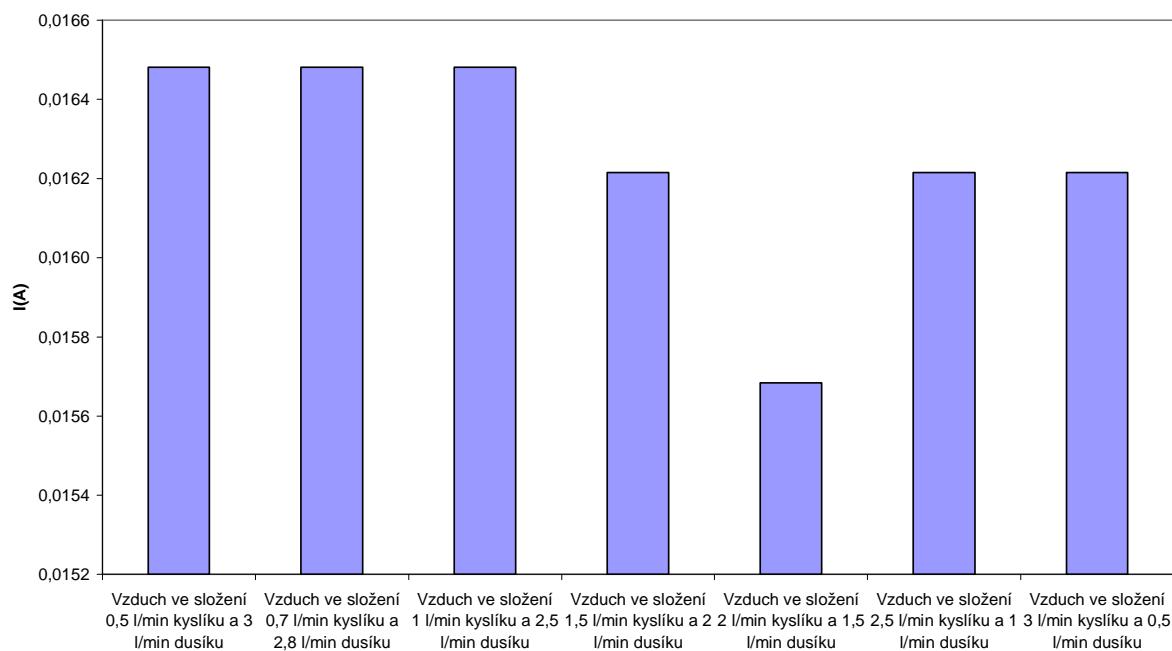
Obr. 8.41 Změna efektivního proudu při různém složení vzduchu pro frekvenci 11,111 kHz

Změna efektivního proudu při různém složení vzduchu pro frekvenci 10,526 kHz



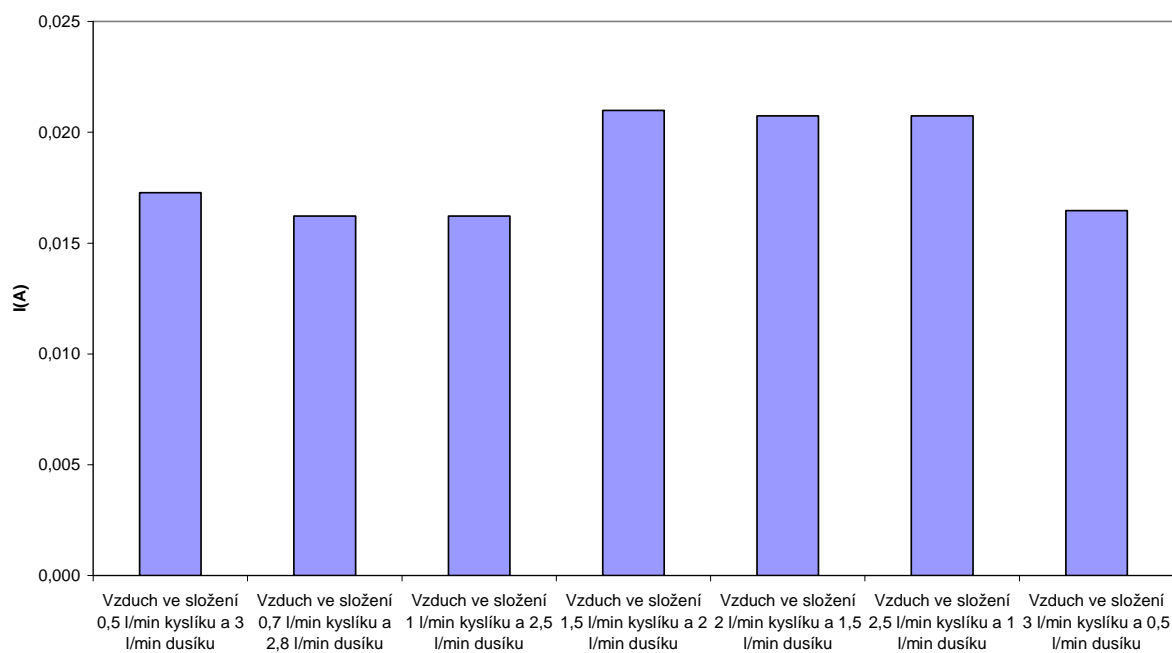
Obr. 8.42 Změna efektivního proudu při různém složení vzduchu pro frekvenci 10,526 kHz

Změna efektivního proudu při různém složení vzduchu pro frekvenci 10 kHz



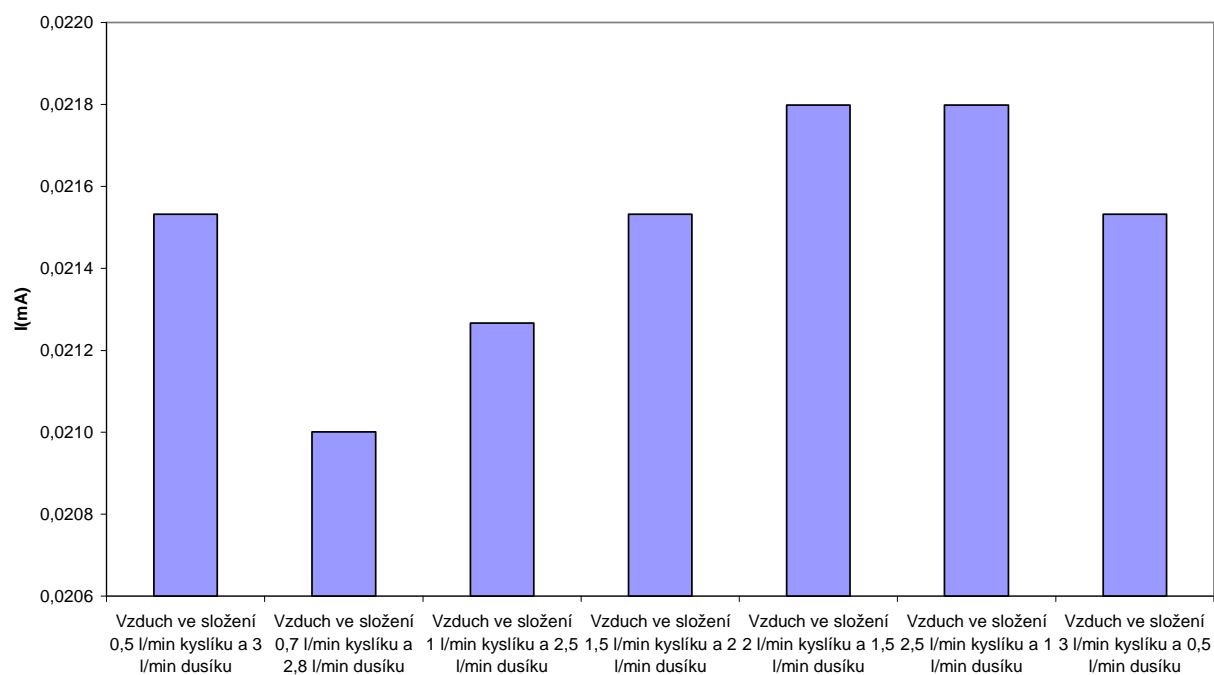
Obr. 8.43 Změna efektivního proudu při různém složení vzduchu pro frekvenci 10 kHz

Změna efektivního proudu při různém složení vzduchu pro frekvenci 9,090 kHz



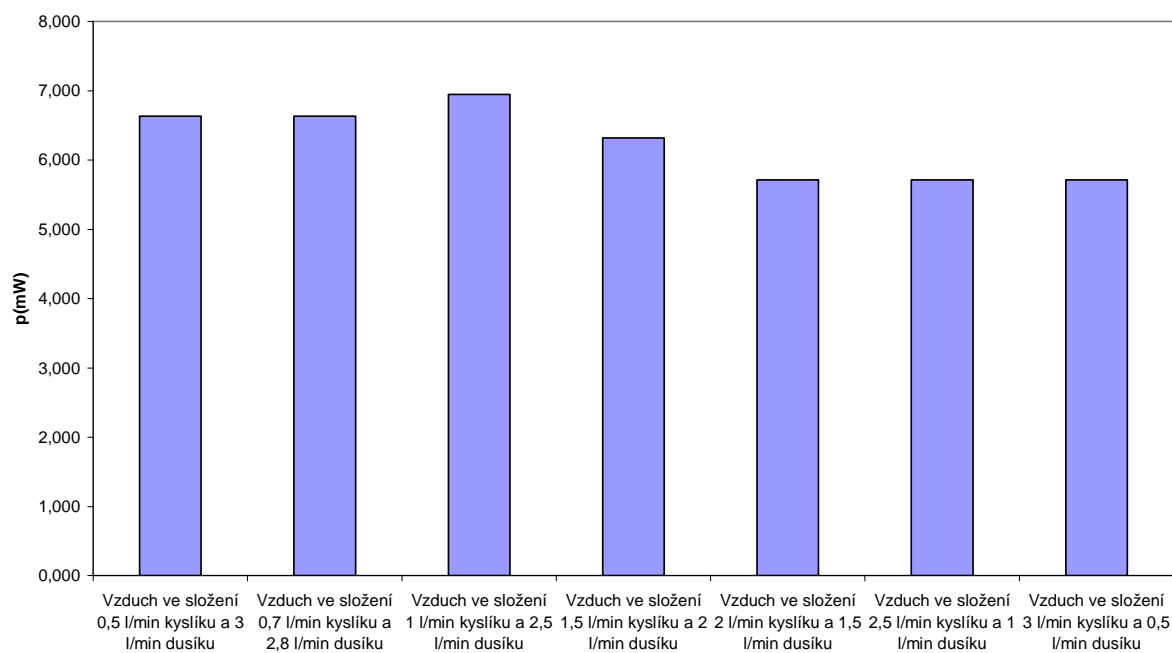
Obr. 8.44 Změna efektivního proudu při různém složení vzduchu pro frekvenci 9,090 kHz

Změna efektivního proudu při různém složení vzduchu pro frekvenci 8,333 kHz



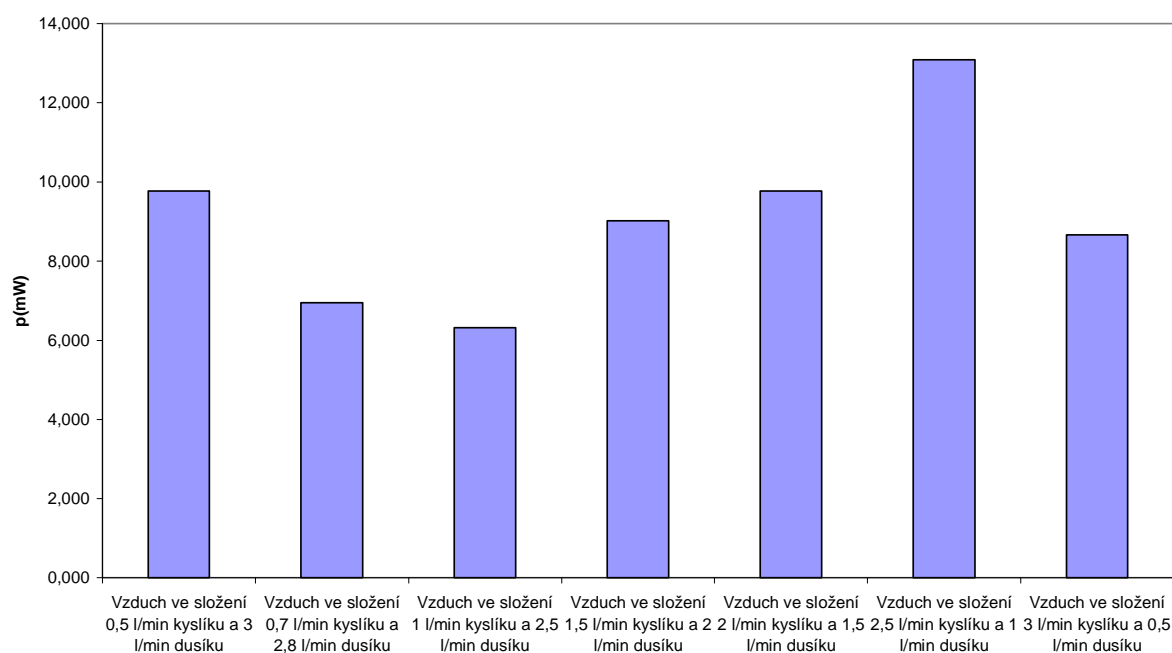
Obr. 8.45 Změna efektivního proudu při různém složení vzduchu pro frekvenci 8,333 kHz

Změna okamžitého v $t=5 \mu s$ výkonu na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 11,111 kHz



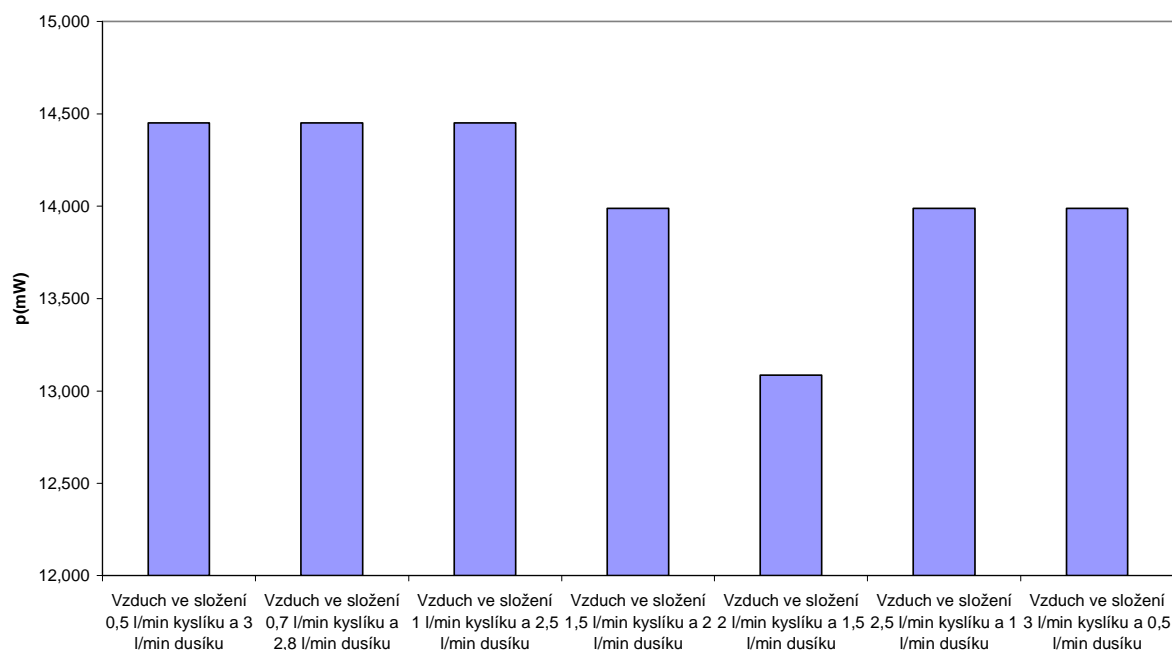
Obr. 8.46 Změna okamžitého výkonu v $t=5 \mu s$ na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 11,111 kHz

Změna okamžitého výkonu v $t=5 \mu s$ na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 10,526 kHz



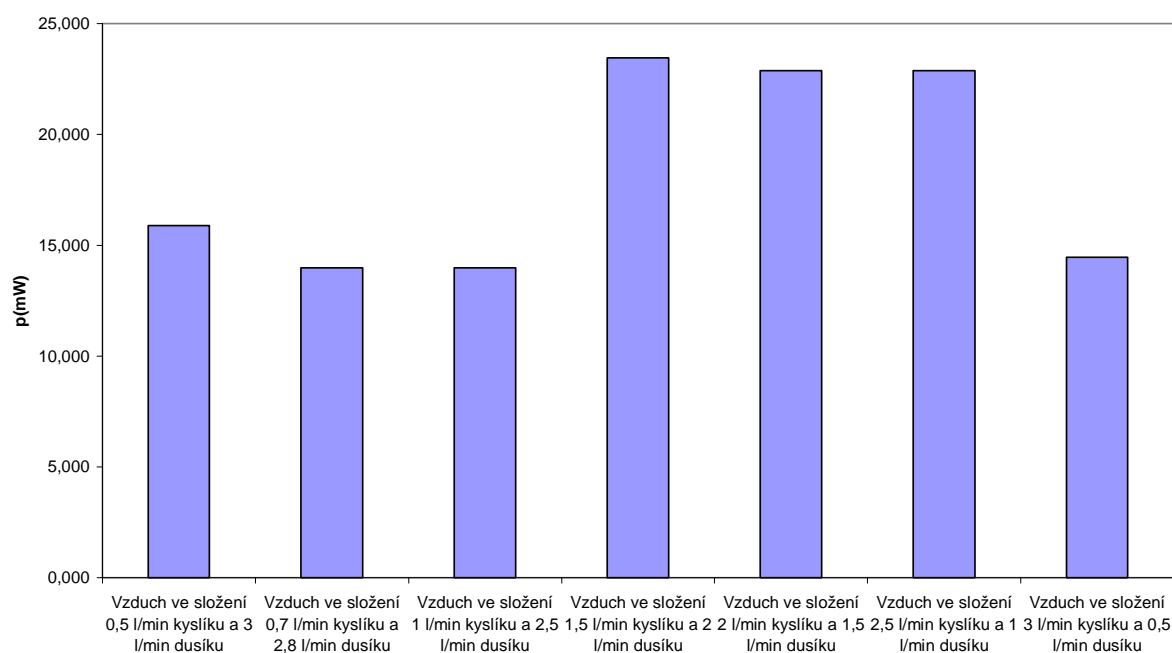
Obr. 8.47 Změna okamžitého výkonu v $t=5 \mu s$ na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 10,526 kHz

Změna okamžitého výkonu $t=5 \mu s$ na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 10 kHz



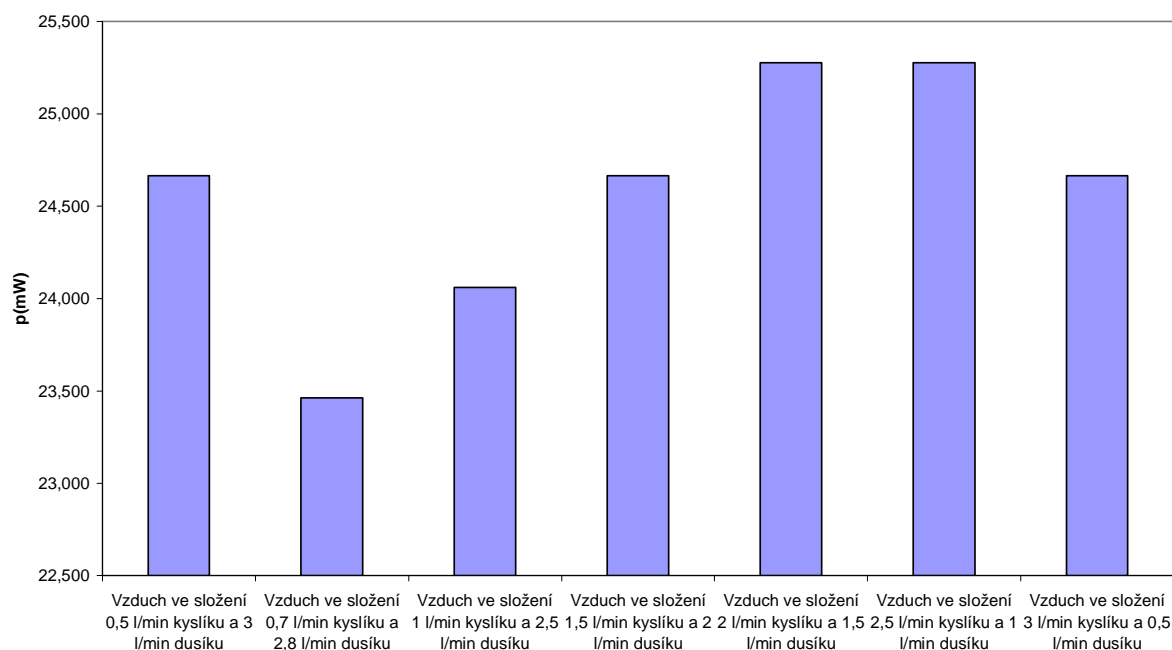
Obr. 8.48 Změna okamžitého výkonu v $t=5 \mu s$ na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 10 kHz

Změna okamžitého výkonu $t=5 \mu s$ na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 9,090 kHz



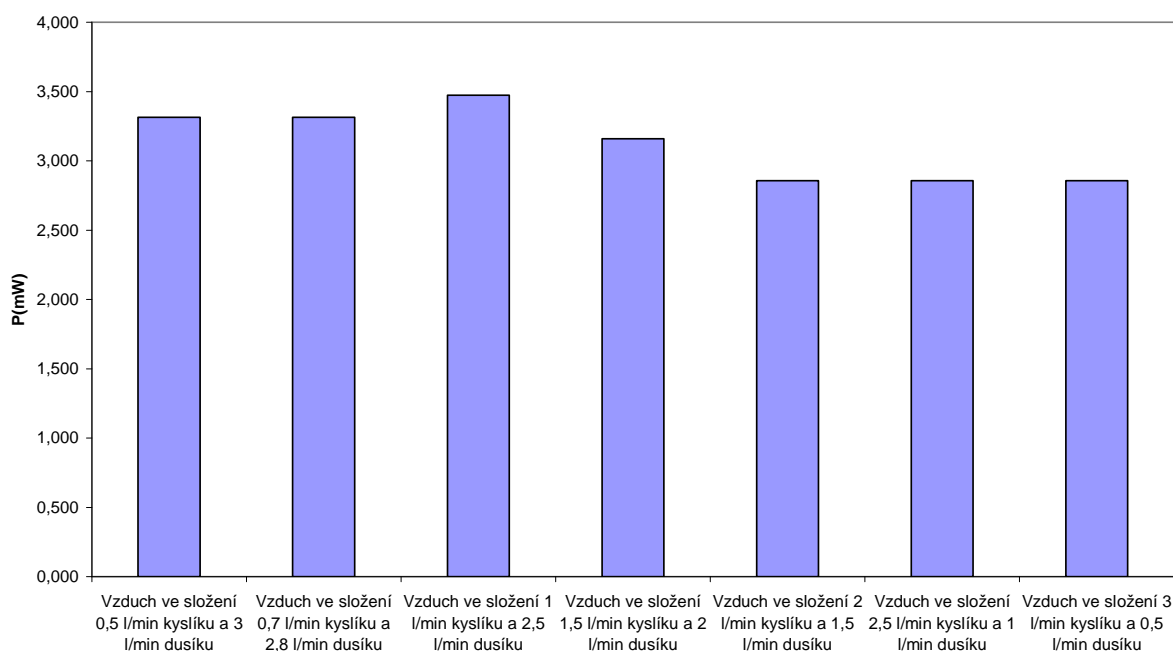
Obr. 8.49 Změna okamžitého výkonu v $t=5 \mu s$ na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 9,090 kHz

Změna okamžitého výkonu v $t=5 \mu s$ na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 8,333 kHz



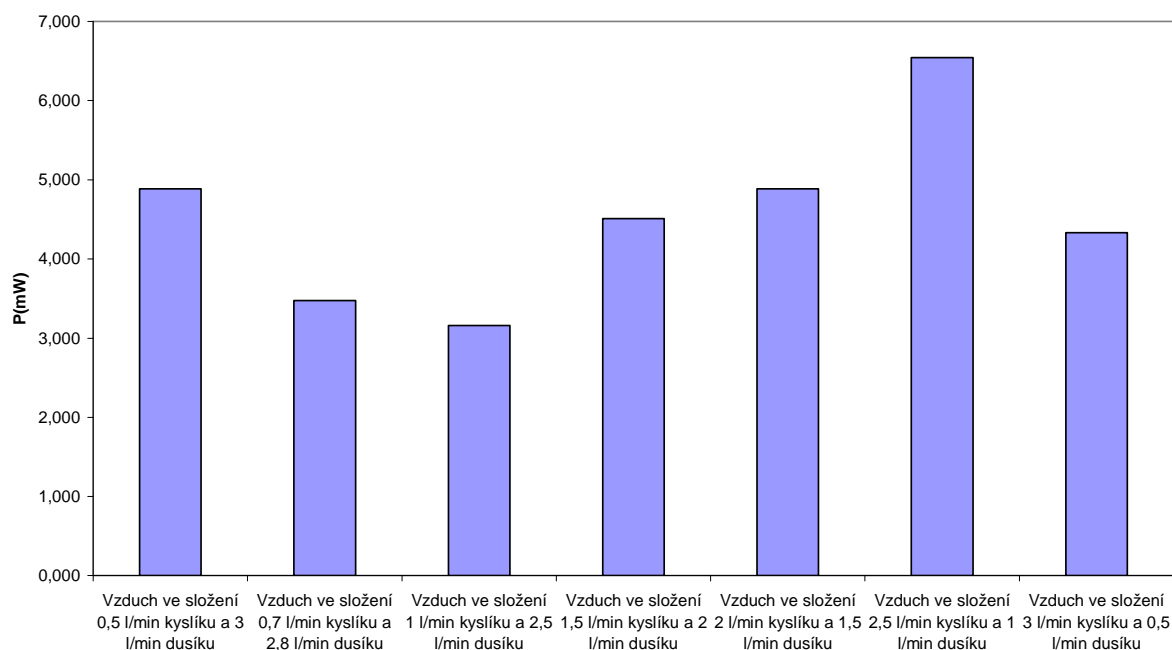
Obr. 8.50 Změna okamžitého výkonu v $t=5 \mu s$ na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 8,333 kHz

Změna středního výkonu na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 11,111 kHz



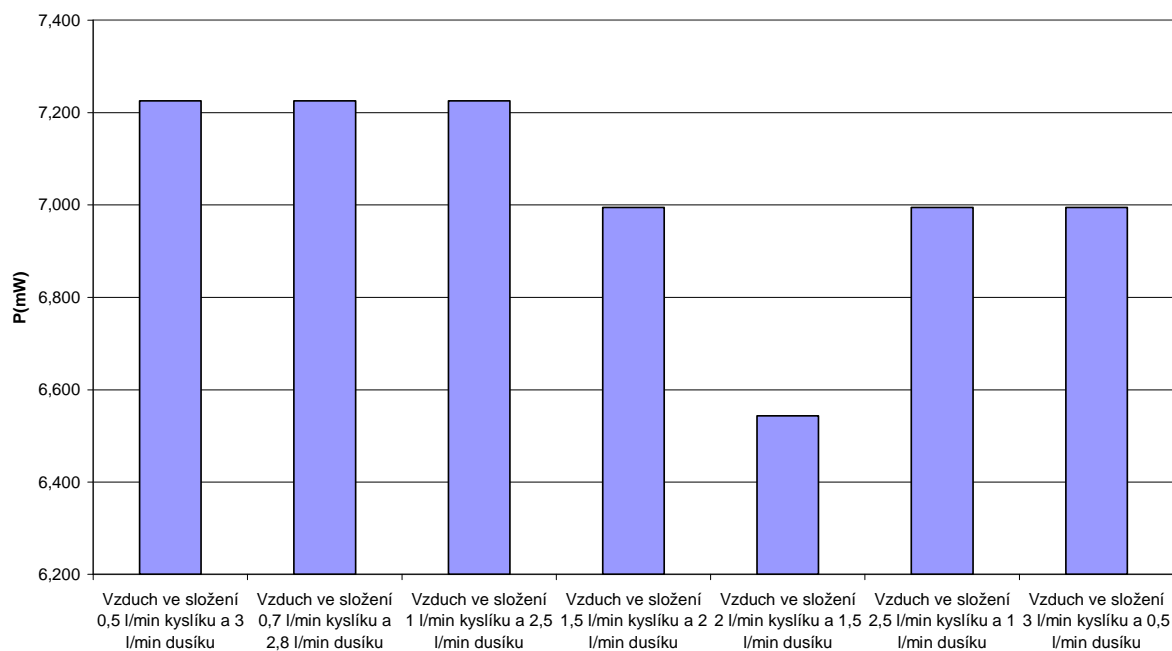
Obr. 8.51 Změna středního výkonu v na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 11,111 kHz

Změna středního výkonu na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 10,526 kHz



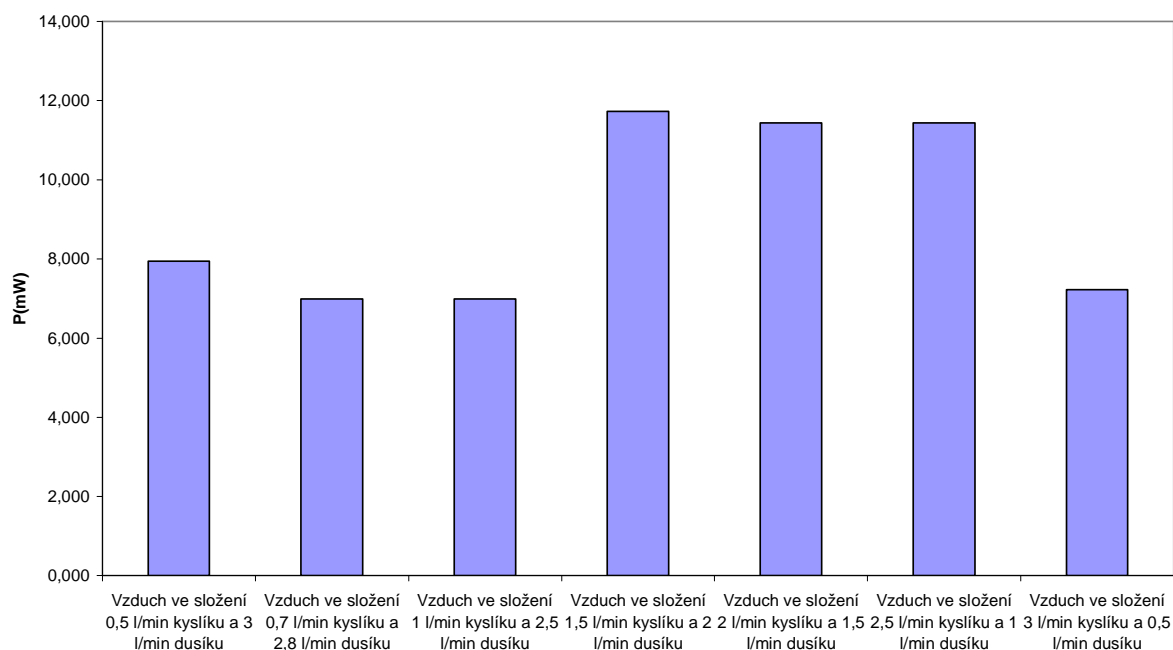
Obr. 8.52 Změna středního výkonu na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 10,526 kHz

Změna středního výkonu na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 10 kHz



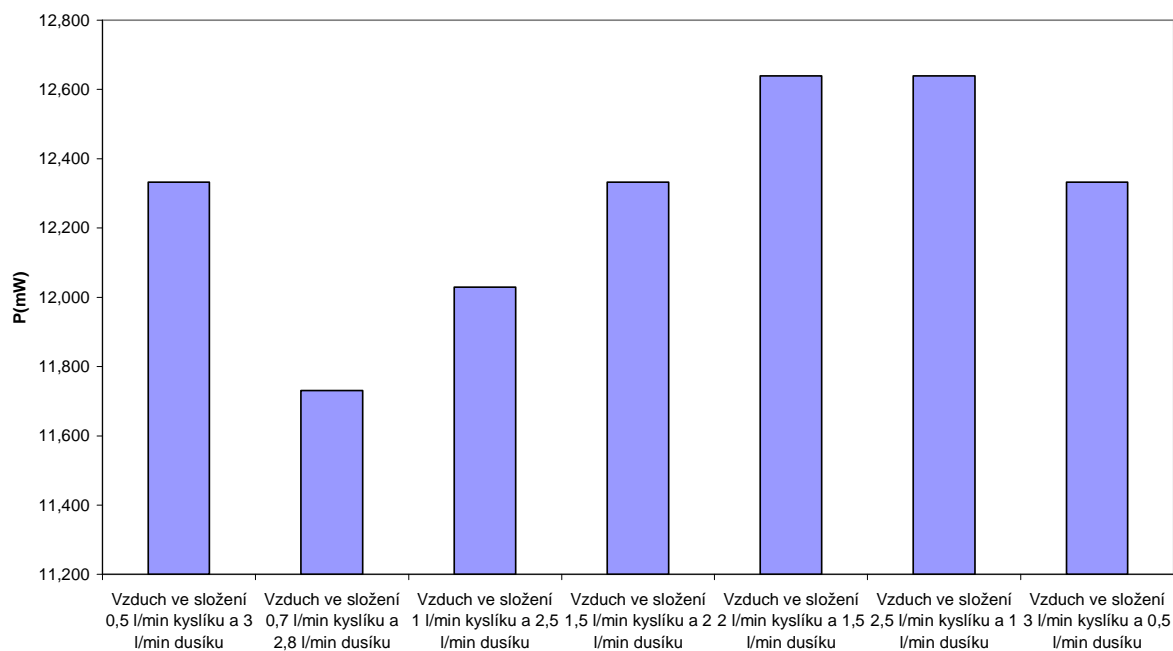
Obr. 8.53 Změna středního výkonu na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 10 kHz

Změna středního výkonu na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 9,090 kHz



Obr. 8.54 Změna středního výkonu na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 9,090 kHz

Změna středního výkonu na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 8,333 kHz



Obr. 8.55 Změna středního výkonu na odporu při různém složení vzduchu pro frekvenci 8,333 kHz